EL AGUA SUBTERRANEA Y LOS POZOS

LIBRO DE REFERENCIA
DEDICADO A LA INDUSTRIA
DE LOS POZOS DE AGUA

Primera Edición 1975

Publicado por:

Johnson Division, UOP Inc.
Saint Paul, Minnesota 55165

Propiedad Literaria, 1966, de

EDWARD E. JOHNSON, INC.

Saint Paul, Minnesota 55104

Biblioteca del Congreso, Tarjeta de Clasificación Número 66-29629



Prefacio .

En el primer capítulo de este libro se hace hincapié en el hecho de que nada es más importante en la constitución de nuestro sistema terrestre que el agua, considerada ésta en todos sus diferentes estados. Son pocos los lectores que tendrán que convencerse de la enorme importancia que, como recurso natural, tiene el agua subterránea. Esta convicción, sin embargo, no siempre ha sido compartida por un número suficiente de personas como para que el reconocimiento que el recurso amerita se haya afirmado lo suficiente. Aún hoy día hay quienes continúan ignorando los valores económicos y estéticos del agua subterránea.

Los antecedentes históricos de este libro se remontan al año de 1929. Fue entonces cuando se inició el envío regular del folleto "Johnson Drillers Journal" a los contratistas de construcción de pozos, departamentos de servicios de agua, funcionarios federales y estatales, miembros de facultades universitarias y otras personas interesadas en los recursos de agua subterránea. Aunque en un principio la publicación fue concebida como un medio para contribuir al intercambio de ideas y experiencias así como para promover el avance de la industria de la construcción de los pozos de agua, el Journal ha servido también para divulgar las actividades de diversas asociaciones de perforadores de pozos, tanto estatales como nacionales.

Los artículos técnicos y semitécnicos sobre el tema del agua subterránea y los pozos de agua atrajeron desde un principio la atención. Conforme el tiempo fue pasando, surgió la seria inquietud de llevar parte del material publicado a la forma de libro. Fué así como ciertos artículos selectos, con pequeñas revisiones, fueron recopilados en un volumen que se publicó en 1947 bajo el título de "Agua Subterránea, su Desarrollo, Usos y Conservación". La gran demanda que tuvo el libro vino a constituir la verdadera recompensa al esfuerzo realizado, y la edición se agotó rápidamente. En los años que siguieron a ello, se ha visto a la industria de la construcción de pozos experimentar muchos cambios y lograr progresos. Los procedimientos han mejorado y se ha desarrollado nueva maquinaria.

Las dependencias estatales y federales han expandido sus programas de localización de los recursos subterráneos de agua de la nación. Se han venido efectuando estudios científicos y desarrollando nuevas técnicas en forma intensa, para evaluar cuantitativamente las reservas de agua en los acuíferos y las cantidades disponibles que podrían utilizarse perennemente.

Además, ha surgido una concientización creciente del inmenso valor de los recursos de agua subterránea, tanto en los Estados Unidos, como también en la mayor parte de los otros países del mundo. Este interés radica en cierto número de factores de los cuales no menos importante es el del exorbitante aumento de la demanda de agua, como consecuencia de la creciente población y economía de la nación. Durante la década pasada, los Estados Unidos

se abocó a un programa de asistencia para mejorar las condiciones económicas de los paises en vía de desarrollo del mundo entero. La salud pública, los niveles de vida y el desarrollo económico están todos estrechamente ligados a la disponibilidad de agua suficiente y de buena calidad. Esto ha hecho que aumente la demanda de información técnica acerca de mejores métodos para obtener abastecimientos a expensas de las reservas de agua subterránea.

Todos estos hechos nos han movido a brindar otra contribución a la industria de la construcción de pozos, en forma de un nuevo libro de referencia. El propósito que nos anima es el de presentar los aspectos técnicos de las manifestaciones del agua subterránea, su movimiento, la hidráulica de pozos, el diseño de éstos últimos y la geologia del agua subterránea conjuntamente con los aspectos técnicos de la perforación de pozos, elección de rejillas, y mantenimiento y funcionamiento de los pozos de agua.

Al describir y explicar las labores que dependen de la habilidad y destreza del contratista de construcción de pozos y de sus ayudantes, nos hemos preocupado por ofrecer ideas prácticas y comprobadas. No se exige pericia ni vasta experiencia como perforadores en ejercicio para poder comprender las partes correspondientes del libro.

Sin embargo, en cuanto al diseño de rejillas de pozos y su aplicación, reconocemos el mérito de cierta autoridad. Edward E. Johnson Inc. ha venido fabricando rejillas de pozo sin interrupción, desde el año de 1904. Las mejoras introducidas a las rejillas y a sus aplicaciones por esta compañia están a la altura de otros avances de la ciencia y la tecnología. En aquellas partes del libro que tratan de las rejillas de pozos, nuestra experiencia nos ha conducido a hacer énfasis sobre la economía que se obtiene a largo plazo, mediante el diseño apropiado de los pozos y el empleo de buenas prácticas de construcción Los propietarios de pozos o sus representantes, al estar mal informados, aceptan con mucha frecuencia propuestas de licitantes hechas con base en el menor costo inicial, sin tener en cuenta que a la postre, ello les causará un perjuicio

La construcción de pozos no puede ser un proceso rutinario. La variabilidad de las condiciones geológicas, como también la de las manifestaciones del agua subterránea dentro del marco geológico, es tan amplia, que hasta cierto punto cada perforación se convierte en una aventura exploratoria. Por consiguiente, la destreza del perforador, que le permite afrontar situaciones imprevistas, es de importancia fundamental para lograr éxito en el desarrollo de las aguas subterráneas.

La dirección y el personal técnico de Edward E. Johnson Inc., esperan que los lectores encuentren en este libro una sólida información técnica que los ayude en el desarrollo económico y racional del agua del subsuelo. Si ello ha de contribuir al beneficio público, al crecimiento de cualquier país o región y al adelanto de la industria de la construcción de pozos, el esfuerzo realizado por los que prepararon este libro, quedará más que recompensado.

JOHNSON DIVISION, UOP Inc.

W. M. Bollenbach, Jr.
Presidente
de la Compañia

CONTENIDO

Agradecimientos . . .

Un libro que cubra tan amplio rango de material como el presente, debe necesariamente obtener ideas e información de varias fuentes. Con gratitud reconocemos su colaboración a gran número de miembros de los servicios geológicos, de la ingeniería sanitaria y de la industria de los pozos de agua, en general.

Se ha hecho todo lo posible para otorgar reconocimiento en el libro a cuantos lo merecen. Las numerosas publicaciones del Servicio Geológico de los Estados Unidos y las de organizaciones semejantes de los diversos estados, han sido de gran ayuda. Los lectores encontrarán que se ha hecho un uso liberal de este material. Se ha tratado de dar reconocimiento a las fuentes consultoras de información, ya sea mediante referencias directas o generales. Es probable que el mérito de algunos haya sido ignorado sin intención, puesto que existe más de una fuente de información para gran parte del material, y su origen puede ser desconocido para nosotros. Damos excusas por tal omisión.

Extendemos nuestros agradecimientos a aquellos que nos otorgaron permiso para utilizar ilustraciones y citas de textos. De igual manera agradecemos a las personas ajenas a nuestra organización que, después de revisar partes del contenido, nos hicieron sugestiones de gran ayuda y una crítica constructiva.

La asistencia editorial se debe a A. Phillips Beedon. Arpad Rumy preparó casi todos los dibujos lineales. La mecanografía de la mayor parte del manuscrito fue realizada por Suzanne Schroeder.

El texto completo fue escrito o compilado por miembros de nuestro personal técnico. Autores de varios capítulos son G. F. Briggs, Vice Presidente de Ingeniería, A. G. Fiedler, Consultor; Sam R. Goodman, Gerente, Departamento Industrial; Joe L. Mogg, Ingeniero Jefe, División de Rejillas de Pozo; R. L. Schreurs, Geólogo *Senior* y H. O. Williams, Editor del Johnson Drillers Journal. El texto compuesto fue editado y coordinado por G. F. Briggs y A. G. Fiedler.

JOHNSON DIVISION
UOP Inc.

El Agua Subterránea y los Pozos

Capitulo 1

El Hombre es un Esclavo del Agua

NIÉGUESELE A UN hombre su alimento y podrá vivir durante días. Pero, quítesele el agua y la muerte sobrevendrá en término de horas. Sólo la falta de aire lo aniquilaría más pronto.

No es de sorprenderse, pues, que mucho antes de que el primer cavernícola descubriera que él podía dejar huella de su presencia mediante toscos grabados en la pared de su cueva, el agua haya sido el impulso vital de todas las civilizaciones.

Ciertamente, las cantidades de agua que nuestro cuerpo necesita para subsistir, son relativamente pequeñas si se las compara con su peso; algo así como 2.50 litros por día en una persona moderadamente activa y que habite en un clima templado. Pero cada proceso fisiológico se halla tan ligado a la presencia de esta cantidad de agua, que no hay verdad más grande que la expresión de que toda la vida depende del agua. El agua constituye una gran parte de la protección del embrión antes de su nacimiento, de la regulación de la temperatura del cuerpo, de la respiración, del funcionamiento de las glándulas, de la digestión, y de la lubricación de las articulaciones.

Cuando falta el agua para realizar los procesos fisiológicos, el hombre pierde su apetito, desnutriéndose e incapacitándose hasta que la muerte sobreviene.

A más de las demandas del cuerpo, existen otras imperiosas necesidades que exigen adecuado abastecimiento de agua. Los alimentos que la tierra produce dependen del agua tanto para su crecimiento como para alcanzar su condición nutritiva, ya que los minerales del suelo deben primero ser disueltos antes de que las plantas los puedan utilizar.

Una buena parte de las proteínas y de los carbohidratos que el ser humano necesita, provienen de la vida animal, ictiológica y vegetal que se desarrolla únicamente cerca de o en los océanos, lagos y ríos. Se encuentran, además, los animales recubiertos de piel que el hombre primitivo utilizó para confeccionarse sus rudimentarios abrigos que utilizaba para protegerse contra las inclemencias del tiempo y que la mujer de hoy mira como indumentaria representativa de una cierta condición social.

Y también, ha sido a lo largo de las rutas fluviales naturales que el hombre se ha

desplazado desde tiempos remotos tras el afán de extender su cultura y obtener más y más del primitivismo bajo su dominación. Basta con observar las ciudades más grandes de América y relacionar cada una de ellas con el océano, con un lago o con algún río, para tener que aceptar que, a pesar de nuestra habilidad para conquistar el tiempo, la distancia y el espacio, somos aún vasallos de una sustancia superior, el agua.

Nuestro asombro ante el más esencial de los minerales de la tierra, que el hombre ha aprendido a utilizar en sus estados líquido, de vapor y sólido, nos lleva hasta el corazón mismo de nuestro culto religioso. La Biblia abunda en testimonios que destacan la importancia del agua y su participación en el modo de vida establecido por el Ser Supremo.

En las civilizaciones paganas que antecedieron a la era Cristiana, el agua fue también la suprema fuerza. Las excavaciones de ruinas en la India, que datan de 5,000 años atrás, han revelado la existencia de sistemas de abastecimiento de agua y de avenamiento tan completos, que incluían piscinas y baños de uso público. Casi al mismo tiempo en Egipto se había construido la primera represa conocida en el mundo para el almacenamiento de agua, destinada a usos doméstico y de riego: una estructura de enrocamiento de 12 metros de altura y 108 metros de largo. Los granjeros de Arabia utilizaron los cráteres de volcanes extinguidos para que se constituyeran en depósitos de almacenamiento de agua de riego y excavaron pozos profundos para obtener su agua potable.

El sabio Rey Salomón ganó fama imperecedera con sus decisiones como magistrado, pero su sabiduría también se concentró en la construcción de acueductos. Hipócrates, el vetusto griego que a través de los siglos ha sido reconocido como el padre del movimiento de salud pública y creador del juramento que aún hoy hacen los médicos que empiezan a ejercer su carrera, advirtió los peligros del agua contaminada y previno la necesidad de filtrar y hervir la que se utilizara para beber.

En los lugares en que se ha satisfecho la demanda de agua pura para beber, el desarrollo nacional y el nivel de vida han aumentado. En los que esa meta no se ha logrado, el desarrollo se ha retrasado y el nivel de vida permanecido bajo.

Hoy día, el agua inadecuada o peligrosa representa uno de los más formidables obstáculos al desarrollo de la nación y a la mejora del nivel de vida en cualquier parte del mundo.

En vista de ello se ha publicado este libro, cuyo propósito es el de ilustrar a los perforadores de pozos, ingenieros y funcionarios públicos sobre los hechos relativos al agua, el don más preciado que la naturaleza le ha dado al hombre, con la finalidad de que se logre una utilización más efectiva de los recursos existentes de agua y que la humanidad sea servida en forma más adecuada.

Si este libro llegare a constituir la llave que abra la puerta de un mejor conocimiento del agua subterránea, de sus características, orígenes y de desarrollo para fines utilitarios, el esfuerzo hecho en su preparación estaria más que justificado.

Fuentes de Agua de Utilización Humana

Sólo hay dos fuentes de agua a disposición del hombre, a saber: las de la superficie, que comprenden los lagos, ríos, áreas de drenaje que envían el agua hacia los embalses y los procedimientos que permiten captar y retener el agua de lluvia; y las subterráneas, que incluyen a los pozos, manantiales y galerías horizontales.

En la realidad, como veremos, las fuentes superficiales y las subterráneas no siempre están separadas. Lo que en cierto lugar es agua de superficie, puede convertirse en agua subterránea en otro, pudiendo a su vez emerger de nuevo como agua superficial en

un tercer sitio. Esto es posible por las interconexiones hidráulicas que existen.

Siempre ha sido más fácil comprender las fuentes de superficie, puesto que se las puede ver y observar. Es alrededor del agua subterránea que se ha creado una aureola de misterio, de superstición y teorías infundadas, que todavía persiste, más que nada, porque no se ha dispuesto de maneras rápidas de disiparla.

Digna de mención es la persistencia aún hoy día del uso de la más antigua y poco confiable práctica de exploración de agua, "la hechicería del agua". Remontándose a los tiempos bíblicos, aparece muchas veces en la Biblia la idea aún muy arraigada en la mente popular, de que mediante una varita mágica bifurcada, se puede localizar agua subterránea. La creencia en este método de localizar agua, se ha mantenido a través de los años, no obstante que no tiene ni la más ligera base científica. Diversas publicaciones contienen mucho material referente a la hechicería del agua, por lo que no la comentarmos más.

Indudablemente que la falta de comprensión de las manifestaciones del agua subterránea puede atribuírse al hecho de que los antiguos científicos y filósofos no tenían idea de donde provenía y hacia donde se dirigía ésta. A falta de esos conocimientos, ellos y sus contemporáneos tuvieron que desarrollar teorías sin comprobación, muchas de éstas erróneas, para poder explicar la procedencia del agua en los pozos y el flujo de los manantiales.

Una creencia era la de que el agua del mar se convertía en agua dulce conforme ésta fluía desde el mar hacia los manantiales, por dentro de las cavernas subterráneas. Cuando un pozo excavado lograba éxito en producir agua, el fenómeno se explicaba diciendo que éste había interceptado una de las corrientes subterráneas de agua desalada.

El progreso que se ha hecho desde entonces en cuanto a la ampliación de nuestros conocimientos sobre el agua subterránea, ha sido inmenso. Hemos logrado, por ejemplo, una mejor comprensión de la importancia que tiene el agua subterránea como fuente de abastecimiento de las necesidades del mundo.

Importancia del Agua Subterránea

Puesto que las aguas de la superficie son tangibles y se han gastado sumas fabulosas de dinero en construir represas, diques, embalses artificiales, acueductos y canales de riego, todas obras visibles, resulta lo más natural que nos inclinemos a pensar que esta manifestación del agua constituye la mayor fuente para satisfacer las necesidades del mundo.

En realidad, algo menos de un 3 por ciento de la disponibilidad de agua dulce fluída, de nuestro planeta Tierra, corresponde a ríos y lagos. El 97 por ciento restante, algo así como 1,230 kilómetros cúbicos de agua se encuentran en el subsuelo.

El agua dulce en estado líquido de lagos y ríos representa la parte que se halla en tránsito, en tanto que las fuentes subsuperficiales corresponden al agua almacenada. El agua subterránea se ha venido acumulando a través de varios siglos, aumentando ligeramente su volumen cada año por el efecto de la lluvia. Como promedio anual, el agua de los ríos es restituída unas 31 veces.

Más aún, no toda la cantidad de agua que se encuentra por debajo de la superficie de la tierra puede extraerse de las formaciones que la contienen. Una parte se halla dentro de formaciones tan profundas que sólo los costos de bombeo invalidarían su extracción. Otra parte yace dentro de acuíferos que se oponen de diversas maneras a la extracción y desafían la acción de bombeo.

Aunque las cifras comparativas de los volúmenes de agua disponibles tanto en la superficie como en el subsuelo no pueden

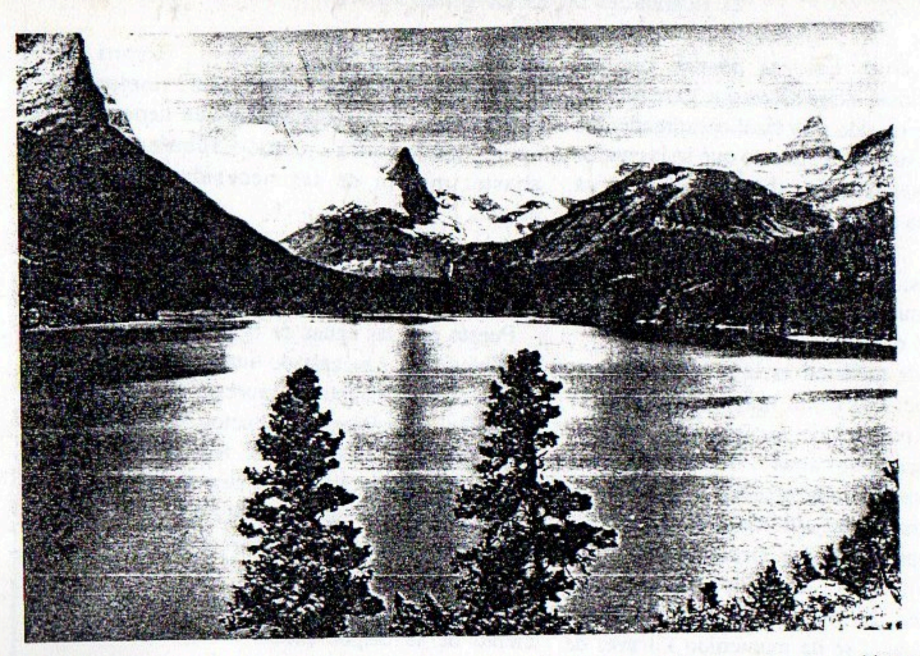


Fig. 1: En este paraje majestuoso, la naturaleza almacena agua temporalmente en los picos cubiertos de nieve y en los lagos intermontanos. *(Cortesía de Great Northern Railway)*

adoptarse como índice de los recursos reales, sí nos revelan que la reserva subterránea es varias veces mayor que la de la superficie y que no se ha hecho suficiente hincapié en el desarrollo y utilización de las vastas reservas de agua dulce que yacen bajo la superficie de la tierra.

Utilización del Agua Subterránea en la Antiguedad

En la obra de H. G. Wells, *Esbozo de la historia* (Outline of History), se refiere con claridad a la importancia y al uso que se ha hecho del agua subterránea desde el comienzo de los tiempos. Muchas de nuestras antiguas civilizaciones tuvieron su fundamento en amplios abastecimientos de agua subterránea como también en las de la superficie y muchas otras fracasaron por la falta de tan preciado líquido.

Los antiguos Persas construyeron túneles y pozos para interceptar fuentes de agua subterránea. Los primitivos Egipcios y los Chinos llegaron a familiarizarse lo suficiente con los métodos de perforación hasta llegar a estar en capacidad de horadar agujeros para obtener agua de fuentes subterráneas. Alrededor del año 2100 antes de Jesucristo, en las postrimerías de la IIa. Dinastía, un líder de las fuerzas egipcias de Mentuhotep declaró haber perforado 14 pozos con un ejército de 3,000 hombres. Alrededor de cuatro siglos después, Sanacharib utilizaba poleas para elevar agua de pozos.

Una de las primeras referencias bíblicas habla de la historia de Moisés que, tocando con su varita una roca, hizo brotar una fuente de agua. La maestría que se puede observar en la construcción del pozo de José, en El Cairo, lo ha convertido en el más conocido de los pozos de la antiguedad. Excavado en roca sólida, el pozo fue construido en dos tramos: el superior tiene 50 m. de profundidad y una sección de 5.5 m. por 7.3 m., y el inferior que se extiende por otros 40 m. hasta alcanzar una profundidad total de 90 metros.

El agua era elevada mediante cubos suspendidos de cadenas sin fin, siendo las del tramo inferior impulsadas por burros moviéndose dentro de una cámara situada en el fondo del tramo superior.

Un interés general por perforar más que por excavar pozos, se despertó en el Siglo 12 después del éxito obtenido con la perforación de un pozo en Artois, Francia, en el año de 1126. El término "artesiano" se deriva del nombre de esa localidad.

En 1841 se completó un pozo en Grenelle, cerca de París, que fue por muchos años el más profundo del mundo. La perforación de este pozo se empezó en diciembre de 1833 y llegó a alcanzar una profundidad total de 548 metros. Su construcción constituye un caso único, porque aportó muchas experiencias en cuanto a perforación profunda, a la recuperación de herramientas rotas y roca perforada.

La ciencia de la perforación a gran profundidad recibió un gran impulso a través de la experiencia obtenida al perforar el pozo de Passy, en París, cuya completación tuvo lugar en el año de 1857. Este pozo, que tiene un diámetro de 71 cm., fue ademado hasta una profundidad de 586 m. La obra erogó un caudal de 21,150 m^3 diarios de agua (881 m^3/hora) que se elevó hasta 16.5 m. por sobre la superficie del terreno.

A la fructífera completación de pozos en Francia, siguió la perforación profunda en Inglaterra y Alemania. Algunos de estos pozos alcanzaron dimensiones relativamente grandes y brindaron a los geólogos la oportunidad de inspeccionar la corteza terrestre hasta profundidades en verdad muy grandes.

En los Estados Unidos, uno de los más antiguos pozos de que se tiene memoria, es un agujero excavado a mano, en San Agustín, en La Florida. El primer pozo perforado en este país para abastecimiento de agua, pudiese ser que tuviera relación con el intento de explotar las trazas de sal en el valle del Río Kanawha, en Virginia Occidental. En 1806, dos hermanos apellidados Ruffner se dedicaron a incrementar la producción de un lago salado, parte del Gran Lago de Buffalo, para lo cual perforaban con una barra larga de hierro a la que iba unido un trépano de acero de 6.4 cm. Esta herramienta se suspendía de una pértiga dotada de un resorte, mediante una cuerda. Después de una lenta y tediosa labor, lograron finalmente perforar un agujero hasta una profundidad de 8.5 m., a la cual alcanzaron interceptar un caudal apreciablemente grande de agua salada. La perforación de pozos de sal se convirtió en una práctica generalizada en Virginia Occidental y por ahí de 1814, por lo menos existía un pozo que había alcanzado una profundidad cercana a los 145 m.

Antecedentes de la Perforación por Percusión

Poco antes de 1823, un individuo llamado Levi Disbrow se constituyó en un observador muy interesado de la perforación de pozos de sal en Virginia Occidental. Llegó a la conclusión de que los métodos que se empleaban con ese propósito bien podrían adaptarse a la perforación de pozos de agua. Su primer pozo lo perforó en New Brunswick, New Jersey, en el año de 1824 y hasta una profundidad de 42 metros. Así, logró hallar agua bajo una presión artesiana suficiente como para que se elevara hasta la superficie del terreno. La perforación se continuó hasta los 53 m., obteniéndose una descarga de 0.10 litros por segundo con una surgencia de 90 cm. por sobre la superficie del terreno.

Durante los años que siguieron a estos logros, el conocimiento de las condiciones específicas del agua subterránea quedó relegado a la experiencia obtenida por los primitivos perforadores de pozos. Antes de 1873, no se hizo mucho estudio sistemático

en los Estados Unidos, del agua subterránea. En el lapso de 1873 a 1879, Thomas C. Chamberlin realizó un estudio de las condiciones artesianas de Wisconsin.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos fue organizado en 1879 con la finalidad de levantar un mapa del país, de estudiar sus recursos minerales y de sugerir las posibilidades de su desarrollo. Los geólogos aceptaron al agua subterránea como un recurso mineral y ya se refirieron a ésta en sus primeros informes.

Sin embargo, el Servicio Geológico no empezó a desplegar su actividad en el campo de las aguas subterráneas sino hasta 1890. Durante la década de 1890 a 1900, un grupo de eminentes geólogos del Servicio dirigió su atención al agua subterránea y publicó varios estudios extensos y de sólida base científica.sobre el tema. Por primera vez, las manifestaciones específicas de las condiciones del agua subterránea fueron puestas en evidencia y mostradas en cartas y mapas.



Fig. 2: Pozo artesiano surgente en Vila Branca, Portugal, descargando alrededor de 25 litros por segundo.

A partir de 1900 se ha realizado una gran cantidad de trabajo referente a aguas subterráneas. En un principio, la mayor parte fue efectuada por el personal del Servicio Geológico. Después de la Primera Guerra Mundial, los departamentos de geología estatales y otras organizaciones se interesaron en este campo. Laborando en forma cooperativa con el Servicio, han logrado avanzar mucho en cuanto al conocimiento de los recursos hidráulicos subterráneos de la nación.

Aparte de esta acción conjunta para ampliar los conocimientos relativos a los recursos de agua subterránea, el esfuerzo al que los perforadores progresistas de pozos han contribuído, materialmente ha hecho posible el desarrollo de una industria notoria, que tiene como meta la mayor utilización posible de los recursos de agua subterránea y su conservación y protección.

El progreso en este campo puede atribuirse en su mayor parte al celo e interés del desaparecido Dr. Oscar E. Meinzer, geólogo y primer director de la División de Aguas Subterráneas del Servicio Geológico de los Estados Unidos, quien tanto hizo por establecer la hidrología de aguas subterráneas como una ciencia reconocida en el país.

La demanda de agua subterránea en los Estados Unidos ha venido en constante aumento. En 1960, el caudal extraído en 48 estados continentales alcanzó a 1,022 hectómetros cúbicos por día (42.58 millones de m^3/hora (493 m^3/seg), de los cuales 833 Hm^3 se tomó de los lagos y ríos, y el resto, o sea, 189 Hm^3, provenía de pozos y de manantiales. El número de los pozos que suministraron los 189 Hm^3 no se conoce, pero en la Tabla I del Apéndice se indica la

distribución de esa extración por estados y por fuente de origen.

El Dr. Oscar E. Meinzer, hablando en 1937 ante la Convención de la Asociación Americana de Perforadores de Pozos, celebrada en Nueva York, vaticinó con exactitud el papel tan importante que llegaría a desempeñar el agua subterránea en el avance económico y social del país. Los siguientes párrafos son un extracto de la conferencia del Dr. Meinzer:

"Podría decirse que el reciente período de intenso desarrollo de las aguas subterráneas empezó alrededor de 1915. Durante este lapso, los métodos de construcción de pozos en arena y grava que ya se habían empleado en algunas partes del medio y lejano oeste, se han adoptado en todo el país y se han mejorado notablemente. El desarrollo de los procedimientos de construcción de pozos ha dado acceso a grandes reservas de agua que antes de ello no eran prácticamente explotables, especialmente en la parte oriental del país. El avance radical de los métodos de bombeo ha culminado con el perfeccionamiento de la bomba centrífuga de turbina.

"Muchos nuevos abastecimientos que se han desarrollado a través del territorio del país en años recientes, han dotado de agua a pueblos que carecían de este servicio.

"Se han logrado asimismo grandes avances en los métodos de construcción de pozos que suprimen la contaminación en la superficie, en los puntos de captación y los tramos intermedios.

"Estas importantes innovaciones en lo que respecta al agua subterránea, han disminuído la tendencia a sustituir con agua de la superficie los abastecimientos públicos de grandes ciudades que han venido haciendo uso del agua subterránea. Durante este período la utilización de agua de pozo para riego ha aumentado notablemente, principalmente en California, como también en otros estados de clima árido y semi-árido, en donde la sequía de años recientes ha



Fig. 3: Esta mujer congolesa, toma agua de una sucia charca para satisfacer la demanda diaria de su familia.

despertado un inmenso interés por el agua subterránea.

"Ultimamente han proliferado los desarrollos de agua subterránea, en escala que va desde moderada a muy grande, para una diversidad de propósitos que abarca desde instituciones públicas, hoteles, fábricas, molinos, plantas enlatadoras, lecherías, instalaciones de energía, plantas acondicionadoras de aire, hasta establecimientos de recreo.

"La nueva industria de pulpa para papel del sur del país, está imponiendo en la actualidad grandes demandas de abastecimiento de agua subterránea a ciertas localidades, a la vez que el acondicionamiento de aire demanda una extracción creciente de agua subterránea en una gran parte de las ciudades en que se puede contar con pozos capaces de brindar un rendimiento apreciable.

"En algunos lugares se ha hecho sentir una drástica disminución del uso de agua subterránea debido a que se han instalado servicios con agua superficial, se han cambiado los procesos industriales, o por otras razones; aún más, el consumo de agua

durante los años de depresión económica, ha declinado. Un examen de la situación nos indica que esta disminución local y temporal se halla de sobra compensada por la tendencia a un consumo creciente de agua subterránea.

"Es evidente que nos estamos enfrentando cada día más que nunca, al problema práctico de la cantidad de agua que puede extraerse mediante pozos, cada año, ya sea por bombeo o por flujo artesiano. Dondequiera, este problema plantea el interrogante de hasta dónde el agua que se extrae de los pozos, podría ser reabastecida o cuánta está siendo obtenida a expensas del almacenamiento. Resulta evidente que conforme se van conociendo las limitaciones de las reservas de agua subterránea, sobrevendrán restricciones de la perforaciónde de pozos destinados a nuevos abastecimientos. Queda aún mucho por hacer en lo tocante a la perforación de pozos en regiones que aún no se han desarrollado totalmente y en las que se hallan sometidas a un intenso bombeo, lo mismo que en la sustitución de pozos antiguos y defectuosos, y en la manera de distribuir la extracción, para reducir el desperdicio natural, un abatimiento localizado excesivo o para evitar el afiujo de agua salada.

"En los Estados Unidos, el consumo de agua está aumentando a un ritmo mayor que el de la población. Ello debe ser así. El agua nos pertenence para utilizarla en beneficio propio; no hay razón en dejar que se pierda si puede utilizarse para que contribuya al bienestar humano. Lo que sí debemos procurar, es evitar el agotamiento de nuestras inapreciables reservas subterráneas. Ciertamente, la conservación y utilización eficientes de los depósitos naturales constituyen uno de nuestros mayores problemas nacionales cuya resolución es de inmediata urgencia."

Las circunstancias relativas al agua subterránea que se han presentado desde 1937 confirman plenamente los vaticinios del Dr. Meinzer. Gran parte de la actividad en que él hizo hincapié, está aun por iniciarse.

Los perforadores de pozos, agencias estatales, municipalidades, organismos gubernamentales e ingenieros consultores, tienen todos un común interés y responsabilidad en promover la utilización racional del agua subterránea. Los perforadores pueden hacer su aporte fomentando el desarrollo y uso de pozos, dentro de las posibilidades del acuífero de satisfacer la extracción, advirtiendo a los usuarios de ubicar y separar adecuadamente los pozos para evitar una interferencia indebida y para que utilicen materiales y procedimientos que garanticen un abastecimiento continuo y sanitario.

La Utilización Racional Ayuda a Preservar Los Recursos Hídricos

Los organismos estatales están en capacidad de brindar la supervisión necesaria para desarrollar y utilizar el agua subterránea en interés de todos. Las dependencias federales, en cooperación con los estados, pueden continuar impulsando la economía nacional a través de investigaciones cuidadosas y precisas de los recursos de agua subterránea y mediante el desarrollo de óptimos métodos científicos aplicables a ese propósito, y publicando los resultados de tales estudios para beneficio e ilustración del público.

Los funcionarios municipales pueden evitar el desperdicio y proteger de la contaminación los recursos de agua subterránea, conservando y manejando sus sistemas de abastecimiento, de distribución y de evacuación de desechos con el criterio que brinda el conocimiento actual sobre la materia. Los ingenieros consultores pueden contribuir a qué se haga una explotación adecuada de los recursos de agua subterránea, procurando mantenerse al dia en cuanto a las innovaciones de los equipos



Fig. 4: Niños vietnameses que bombean agua de un pozo situado en un villorrio. Expertos y suministros cedidos por los Estados Unidos han contribuido a la instalación de pozos en varios paises. Las reservas de agua subterránea abastecen de este preciado líquido a los pueblos, mejorando así su salud.

de perforar, materiales y métodos utilizados en la construcción de pozos, de manera que los aprovechamientos de agua subterránea que se construyan se diseñen dentro de normas óptimas.

Todos los datos y muestras representativas que se obtengan de las perforaciones, deben recopilarse y conservarse en donde puedan ser examinados y clasificados para que cualquier persona interesada las utilice. A los funcionarios públicos les cabe la responsabilidad de ejercer su influencia para ayudar y cooperar en la conservación y protección de los recursos de agua subterránea.

Cada día más personas se concientizan de lo que es el agua. Algunos estados han tomado medidas para conservar el agua subterránea y supervigilar la construcción de pozos. Algunos otros no han hecho nada en este sentido. Sin embargo, es sólo cuestión de tiempo el que todos los organismos interesados en el agua subterránea aúnen sus esfuerzos e información para que se logre una regulación más generalizada de la construcción de pozos, conjuntamente con la promulgación de una legislación que establezca los derechos sobre el agua subterránea y su adecuada utilización.

Conflictos Legales

Las cortes desempeñan un papel decisivo cuando les toca interpretar las leyes

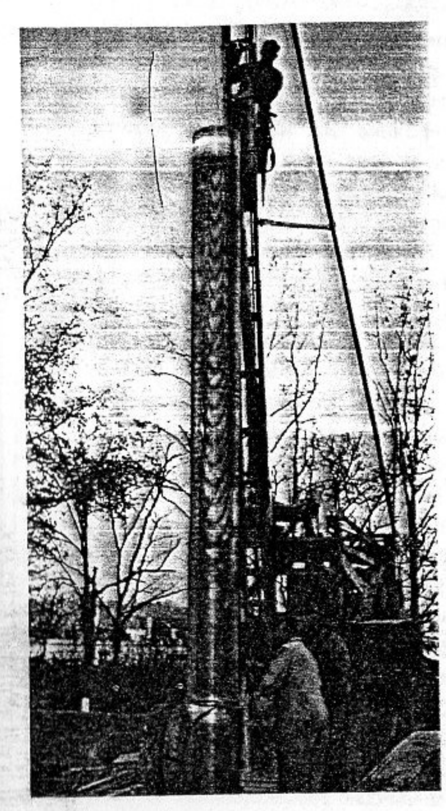


Fig. 5: Instalación de una rejilla en un pozo municipal de Xenia, Ohio. El pozo intercepta una formación de arena y grava y produce un caudal de 394 m³/h.

concernientes a los derechos sobre el agua o el uso prioritario del agua subterránea. Desafortunadamente muchos de los fallos judiciales se basan en clasificaciones del agua que resultan arcaicas y arbitrarias. El agua subterránea ha sido dividida en varios tipos desde el punto de vista legal, que incluyen ríos subterráneos, lagos subterráneos, agua percolante, agua difusa, canales subterráneos definidos, y manantiales. La clasificación del agua subterránea mediante una terminología legal inexacta, parece ser la causa principal del fracaso de muchos intentos de regular su uso y del fomento de medidas de conservación.

Algunos pronunciamientos judiciales que son el resultado de esa situación se han apoyado en suposiciones erróneas que son del todo contrarias a hechos bien reconocidos, inherentes al agua subterránea. Los precedentes establecidos por medio de estas decisiones, resulta difícil hacerlos a un lado. Las leyes de agua subterránea han sido confusas e inconsistentes.

El notario J. C. O'Byrne, en un artículo de la Revista de Leyes de Iowa, escribió: "Ante todo, se ha llegado a la firme conclusión de que nuestras actuales leyes de aguas resultan inadecuadas a las condiciones modernas. En segundo lugar, existe una necesidad angustiosa de investigación adecuada basada en el esfuerzo combinado de personas calificadas en todos los campos involucrados. Existe el peligro de que la circumstancia anterior se ignore ante el clamor por una acción legislativa, por lo que solamente un programa ambicioso de investigación minuciosa podría aportar todo lo que se debe de conocer en la compleja labor de promulgar tal legislación."

Las medidas prácticas que nos puedan garantizar la conservación beneficiosa del agua subterránea, no pueden provenir de la noche a la mañana. Aquellas personas con un interés vital en el agua subterránea y una clara comprensión de lo que ésta representa, pueden servir en forma significativa a los intereses del público, a través de una discusión inteligente de los problemas implícitos.

Propiedades del Agua

El agua es el elemento que más abunda en la tierra. Su abundancia la convierte en la más común de las sustancias, pero sus propiedades combinadas la hacen a su vez la más exclusiva.

Los científicos suponen que el agua que se encuentra en la corteza terrestre y en la atmósfera, representa un volumen equivalente a tres veces la cantidad de todos los otros materiales juntos. El material que le sigue en abundancia es el feldespato,

según los geólogos, pero en volumen éste representa sólo la sexta parte del total del agua.

Los mares y océanos contienen alrededor del 97 por ciento de toda el agua existente en la tierra. La nieve, los glaciares y los casquetes polares reúnen alrededor de 2-¼ por ciento. Consideradas en conjunto, el agua de los ríos y los lagos y la que se halla por debajo de la superficie de la tierra, representa algo así como seis décimas partes por ciento, del total. El vapor de agua atmosférico, aporta solamente una pequeña fracción en porcentaje.

¿Cuál es la sustancia más abundante, sin la cual la vida no sería posible? Químicamente es un compuesto constituído por dos elementos, hidrógeno y oxígeno, ambos gaseosos en su estado libre. Cuando estos gases se combinan en la proporción muy conocida de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno, se forma el agua, cuyo símbolo químico está dado por la fórmula H_2O. En términos de peso, la proporción de hidrógeno a oxígeno es de 1 a 8.

Henry Cavendish descubrió en forma casi accidental, la composición química del agua, en 1781. Cuando el hidrógeno y el oxígeno se mezclan en forma gaseosa, estos elementos no se combinan. Cavendish descubrió que es necesaria la combustión del hidrógeno en presencia del oxígeno para que se produzca la combinación. Para hacer arder el hidrógeno, él utilizó una bujía eléctrica dentro de un recipiente que contenía ambos gases, y en esta forma obtuvo como resultado varias gotas de agua que se adhirieron a la pared del recipiente.

Desde el punto de vista físico, el agua es un líquido transparente, carente de color, con un leve color azulado cuando se halla presente en grandes masas. El agua pura no tiene sabor alguno y ostenta siempre la misma composición, ya sea que se encuentre en forma líquida, sólida o gaseosa. El agua químicamente pura no existe en la naturaleza y sólo se puede obtener a través de procedimientos especiales de purificación. Hasta hace tan solo pocos años, únicamente se la veía en el laboratorio. Sin embargo



Fig. 6: Una serie de pozos abastece a la ciudad de Dayton, Ohio, con el agua suficiente para su población de 400,000 habitantes. Las instalaciones industriales, tales como la National Cash Register Co., que aparece en la fotografía, disponen de sus propios pozos de gran capacidad, para llenar sus necesidades.
(Fotografía cortesía de Nat. Cash Register Co.)

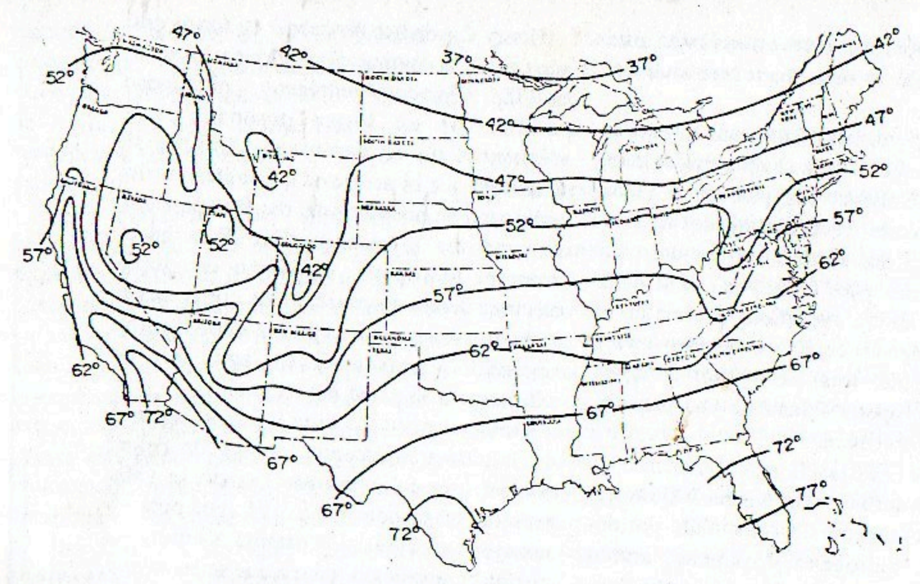


Fig. 7: Mapa que muestra las temperaturas características del agua subterránea en los Estados Unidos. En la mayoría de los lugares, la temperatura del agua subterránea a una profundidad de alrededor de 30 m., es por lo general la misma que la media anual del aire de la localidad.

últimamente se han descubierto muchas aplicaciones prácticas del agua pura a procesos industriales.

El agua pura no es en especial muy agradable. Resulta mucho más placentera al paladar cuando contiene pequeñas cantidades de gases disueltos que pudiera haber tomada del aire, y algunas sales minerales en solución desprendidas de los materiales terrestres con los cuales el agua haya permanecido en contacto.

El agua es alrededor de unas 830 veces más pesada que el aire seco, pero su vapor es a su vez 133 veces más liviano. El vapor de agua asciende para formar las nubes, las que a su vez son enfriadas por las corrientes de aire, hasta condensarse como gotas líquidas que luego se precipitan a tierra en forma de lluvia.

Una característica extraordinaria del agua, considerada como sustancia, es la de que se presenta en tres estados físicos, a saber: sólido, líquido y gaseoso, a temperaturas ordinarias. Esta se transforma del estado líquido al sólido, a la temperatura de O°C, y en el aire, lo único que nos interesa es el vapor de agua, el que es anunciado a diario por los servicios meteorológicos en términos de humedad relativa.

El agua alcanza su mayor densidad a la temperatura de 4°C. Por encima o debajo de esta temperatura el líquido se expande. Cuando se evapora a la temperatura de ebullición de 100°C, ocupa un volumen de alrededor de 1640 veces el que ocuparía en su forma líquida. Cuando se congela para formar hielo se expande en un 9 por ciento, llegando a ocupar un volumen de 1.11 veces el que tendría en su estado líquido. Esta es una propiedad muy importante, y una de sus manifestaciones es la de que el hielo flota en el agua. Si ello no fuese cierto, el hielo que se forma sobre un lago o un río se precipitaría hacia el fondo, y toda la masa líquida quedaría congelada.

La fuerza ejercida por la expansión del agua es capaz de reventar las rocas más duras. En algunas regiones las variaciones de temperatura son de tal magnitud, que cada 24 horas tiene lugar un ciclo de congelación y deshielo. Cualquier cantidad de agua que percole dentro de la menor fisura de una

roca, tenderá a reventar ésta en fragmentos, por lo que la meteorización de las rocas en tales condiciones climáticas proviene de esta propiedad expansiva del agua.

La gravedad específica o densidad relativa de todos los sólidos y líquidos, se mide con relación al agua pura en su estado de máxima densidad. Así pues, la gravedad específica del agua, a la temperatura de 4°C, tiene el valor de 1.00.

A menudo decimos que el agua es prácticamente incompresible, suposición que resulta suficiente cuando se trata de problemas de flujo en tubería, bombeo o transmisión de presión hidráulica mediante agua. Sin embargo, sometiéndola a una presión de 175.5 Kg/cm², un decímetro cúbico de agua, que a presión atmosférica pesa normalmente 1 Kg., aumentaría su densidad hasta llegar a pesar 1.008 Kg. Este leve cambio de volumen del agua, causado por una variación de presión, se ha encontrado que constituye un factor importante en el funcionamiento de aquellos pozos que interceptan acuíferos artesianos. Este aspecto se explicará más adelante.

Es de interés observar que el punto de ebullición del agua varía de acuerdo con la presión atmosférica. A una elevación de 1525 m., el punto de ebullición se alcanza a temperatura de alrededor de 95°C, en tanto que a una altura de 3050 m., aquel tiene lugar a 90°C. Al nivel del mar, el punto de ebullición se obtiene a 100°C. En la costa del Mar Muerto que se halla a 394 m. por debajo del nivel del mar, requiere aplicar una temperatura de 101.1°C para producir la ebullición.

Cohesión, Adherencia y Capilaridad

Las propiedades de cohesión y de adherencia del agua juegan un papel importante en su movimiento y retención a través de las rocas porosas. La cohesión de una sustancia, equivale a su tendencia a permanecer unida y a oponerse a la separación. La adherencia es su particularidad de adherirse a la superficie de otros materiales.

Si una tira de tela de algodón es sostenida de modo que su extremo inferior se halle sumergida en agua, el líquido asciende por el material mediante una acción absorbente. Asimismo, el agua sube por dentro de un delgado tubo, cuando el extremo inferior de éste se sumerge por debajo de la superficie líquida. Estos sencillos experimentos demuestran el fenómeno llamado capilaridad.

La capilaridad es muy importante, en el uso que las plantas hacen del agua lo mismo que en la retención de ésta en los suelos y otros materiales granulares. Este fenómeno depende tanto de la cohesión del líquido como de su adherencia a las paredes de los intersticios contenidos en la masa porosa. Estos intersticios de los suelos y materiales granulares se hallan interconectados en todas direcciones, resultando de ello que las fuerzas capilares actúan también en todo sentido dentro de estos materiales.

La importancia del agua estriba, desde el punto de vista químico, en su aptitud para disolver en mayor o menor grado casi todas las otras sustancias. Frecuentemente se hace referencia al agua como el disolvente por excelencia. Debido a esta característica, todas las aguas naturales contienen gases y sales minerales en solución, los cuales han sido atrapados del aire y del terreno. El agua de lluvia, aunque relativamente pura, contiene algunas partículas de polvo y atrapa gases disueltos conforme se precipita en el aire. Una vez que el agua choca con el suelo, prosigue disolviendo todo lo que puede de los materiales terrestres. Este proceso de disolución continúa durante la percolación del agua desde la superficie y a través de las formaciones subsuperficiales.

En esta forma, va recogiendo una carga cada vez mayor de sales minerales. Sin embargo, la materia orgánica o las partículas en suspensión que pudiere haber recogido cerca de la superficie del terreno, van siendo eliminadas gradualmente conforme percola a

través de éste hasta alcanzar las grandes masas líquidas que se encuentran bajo la superficie y que hemos dado en llamar depósito de agua subterránea.

Referencias

1. MEINZER, O. E. "History and Development of Ground-Water Hydrology." Journal Washing Academy of Science (1934) Vol. 24, pp 6-32.
2. MacKICHAN, K. A. & KAMMERER, J. C., "Estimated Use of Water in the United States. 1960." Circular 456. U.S. Geological Survey, Washington, D. C.
3. O'BYRNE, J. C., "Symposium — Water Use and Control." Iowa Law Review (1956). Vol. 41 N°2. Iowa City, Iowa.
4. NACE, R. L., "Water Management, Agriculture and Ground-Water Supplies." Circular 415 (1960). U. S. Geological Survey, 12 pp., Washington, D. C.

Capitulo 2

Origen, Manifestación y Movimiento del Agua Subterránea

El ciclo hídrico de la tierra o ciclo hidrológico, consiste en la continua circulación de humedad y de agua sobre nuestro planeta. El ciclo no tiene principio ni fin, pero el concepto de ciclo hidrológico se origina en el agua de los océanos, los cuales cubren las tres cuartas partes de la superficie terráquea.

La radiación solar lleva el agua de los océanos hasta la atmósfera por evaporación. El vapor de agua se eleva y luego se aglomera dando lugar a la formación de las nubes. Bajo ciertas condiciones, la humedad contenida en las nubes se condensa y se precipita a tierra en forma de lluvia, granizo o nieve, elementos que constituyen las variadas formas de precipitación. Los hidrólogos y otros científicos denominan a la precipitación agua de "origen meteórico".

La verdadera fuente de casi todas nuestras reservas de agua dulce la constituye la precipitación que cae sobre las áreas terrestres. De ella dependemos para renovar aquellas cantidades que se utilizan y que se toman de los lagos, corrientes superficiales y de los pozos y que son destinadas a innumerables usos humanos.

Parte de la precipitación, una vez que ésta ha humedecido el follaje y el terreno, escurre sobre la superficie de éste y llega hasta los ríos. Otra parte se infiltra dentro del suelo. Una buena parte del agua que penetra dentro del suelo, se detiene en la zona radicular de las plantas y eventualmente es devuelta a la superficie por estas mismas, o mediante el fenómeno de la capilaridad. Sin embargo, otra parte percola por debajo de la zona radicular y mediante la influencia de la gravedad continúa su movimiento descendente hasta que llega al depósito subterráneo.

Una vez que se incorpora al depósito subterráneo, el agua que ha percolado se desplaza a través de los poros de los materiales subterráneos y puede reaparecer en la superficie en aquellas zonas que se hallan a elevaciones inferiores al nivel de las que permitieron su incorporación al depósito. El agua subterránea descarga naturalmente en estos sitios en forma de manantiales y percolación dispersa, manteniendo así el caudal de estiaje de los ríos.

Las corrientes superficiales, que arrastran

tanto la escorrentía superficial como las descargas naturales de agua subterránea, llegan eventualmente hasta los océanos.

Así pues, el ciclo hidrológico constituye un sistema mediante el cual la Naturaleza hace circular el agua desde los océanos hasta la atmósfera y la retorna de nuevo en forma superficial y subterránea a aquéllos, a través de varias rutas, cortas algunas y largas otras en términos de espacio y tiempo. Las fuerzas involucradas en este proceso comprenden radiación, fuerza gravitacional, atracción molecular y capilaridad. Los hechos más destacados del ciclo hidrológico se muestran en la Figura 8.

Aunque la mayor parte de la humedad que se evapora hacia la atmósfera proviene de los océanos, también contribuye al total la evaporada por los lagos, los ríos y por la capa de suelo de la tierra, además de la que transpiran las hojas de las plantas. Los científicos calculan que durante cada año se evaporan de los océanos unas 80,000 millas cúbicas de agua. A su vez, las áreas continentales dejan evaporar otras 15,000 millas cúbicas.

La precipitación total que cae desde la atmósfera es siempre igual en magnitud a la evaporación que retorna a aquélla, de tal suerte que a la tierra retornan cada año, unas 95,000 millas cúbicas de agua. Las superficies terrestres del globo atrapan cada año unas 24,000 millas cúbicas del líquido.

Una partícula de agua necesita, para pasar a través de una o de varias fases del ciclo hidrológico, un tiempo que va desde unas pocas horas hasta algunos meses y en ocasiones siglos. Una partícula de agua puede evaporarse desde el océano y dentro de un período muy corto volver a caer, como precipitación, sobre la misma superficie líquida. Sin embargo, si esta partícula líquida cayera en forma de nieve o granizo sobre alguna altura montañosa, podría permanecer durante meses sobre la superficie del terreno en estado sólido hasta que al

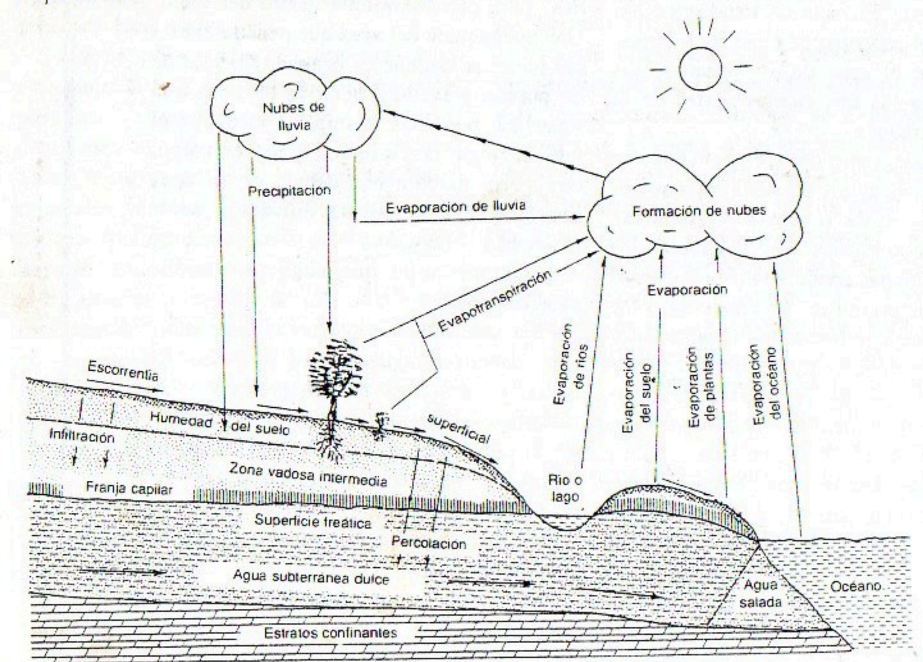


Fig. 8: Diagrama esquemático del ciclo hídrico de la tierra — ciclo hidrológico.

derretirse y unirse con partículas similares, emprendería su larga jornada a través de la superficie o del subsuelo.

Si una partícula de agua se evaporase desde el océano y fuese arrastrada hasta las regiones polares cayendo en éstas en forma de nieve o de hielo, podría permanecer congelada dentro de un glaciar durante siglos antes de retornar finalmente al océano formando parte de un témpano o del efluente derretido del glaciar.

Humedad del Suelo y Agua Subterránea

El agua que se infiltra en el suelo se denomina agua subsuperficial, pero no toda se convierte en agua subterránea. Tres son los hechos fundamentales que tienen relación con esta agua. Primero, que puede ser devuelta a la superficie por fuerzas capilares y evaporada hacia la atmósfera, ahorrándose así gran parte de su recorrido dentro del ciclo hidrológico descrito. Segundo, que puede ser absorbida por las raíces de las plantas que crecen en el suelo, ingresando de nuevo a la atmósfera a través del proceso de la transpiración.

Tercero, que la que se ha infiltrado profundamente en el suelo, puede ser obligada a descender por la fuerza de la gravedad hasta que alcance el nivel de la zona de saturación que constituye el depósito de agua subterránea y que abastece de la misma a los pozos.

No fue sino hasta hace relativamente poco tiempo que se vino a comprender y a demostrar la relación existente entre la precipitación y las manifestaciones del agua subterránea. Algunos filósofos de la antigüedad sugirieron ya este hecho, pero sus teorías siguieron ignoradas durante siglos.

Teoría de la Recarga por Infiltración

Marco Vitruvio Pollio, en los comienzos de la Era Cristiana, escribió acerca de la precipitación y de la escorrentía superficial y sugirió la teoría de la infiltración como el fundamento de la acumulación de agua en el subsuelo. Sin embargo, no fue sino hasta 17 siglos después, que se reconoció a la precipitación como la verdadera fuente del agua dulce que se encuentra por encima y por debajo del terreno.

Hasta un poco antes del año 1700, la creencia general era la de que la precipitación por sí sola era insuficiente como para producir el agua que discurre por los grandes ríos. Prevalecían algunas ideas erróneas, entre otras, la de que el agua del mar se desplazaba subterráneamente y que una vez desalada por destilación o por algún otro proceso desconocido, reaparecía tierra adentro en forma de manantiales, ríos y lagos.

Pierre Perrault, en Francia, fue el que por vez primera cuantificó la precipitación caída sobre una cuenca hidrográfica, midiendo al mismo tiempo la escorrentía producida por esa precipitación. Sus mediciones fueron realizadas en la cuenca del río Sena, hasta el sitio de Aignan-le-Duc. El área de drenaje era de 122 kilómetros cuadrados (47 millas cuadradas). La precipitación media, obtenida de la de los años 1668, 1669 y 1670 alcanzó un valor de 520 milímetros (20.5 pulg.). El volúmen medio de agua que cayó sobre esa área fue de 63 millones de metros cúbicos por año durante ese período de tres años. Perrault midió el caudal del río durante el mismo lapso y obtuvo una descarga media de 10 millones de metros cúbicos por año en el sitio descrito. Estas mediciones demostraron que como la descarga era sólamente la sexta parte del volumen total de precipitación, esta última podía fácilmente satisfacer la escorrentía que se manifiesta como caudal de los ríos, la cantidad de agua que consumen las plantas, y la que percola por debajo de la zona radicular de éstas. Los estudios de Perrault constituyeron un importante avance de la hidrología. De hecho podría decirse que esta ciencia nació a partir de sus trabajos.

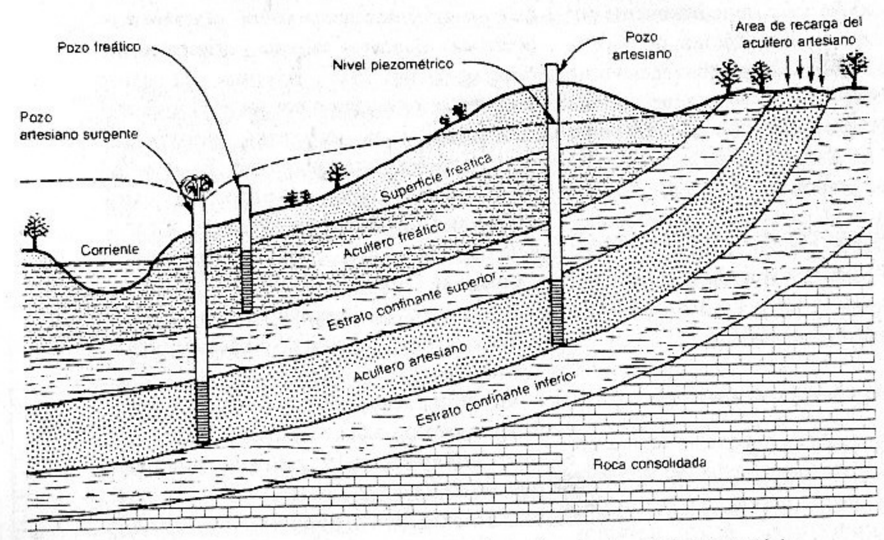


Fig. 9: Las fases subsuperficial y del agua subterránea dentro del ciclo hidrológico.

En casi todos los países, los depósitos de agua subterránea contienen las mayores cantidades existentes de agua dulce. En los Estados Unidos el almacenamiento subterráneo de agua excede en varias veces la capacidad conjunta de todos los embalses y lagos, incluyendo Los Grandes Lagos.

El señor A.M. Piper, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, ha calculado que el volumen total utilizable de agua subterránea almacenada es aproximadamente equivalente al de la precipitación acumulada de 10 años, o también al de toda la escorrentía superficial que llega a los ríos y a los lagos, durante 35 años.

Sin embargo, no toda el agua subterránea contenida en los depósitos del subsuelo está disponible para usos prácticos humanos, debido a limitaciones tales como accesibilidad, confiabilidad, calidad y costos de explotación.

Distribución Subsuperficial del Agua

Para comprender las manifestaciones del agua subterránea, se requiere estudiar la distribución vertical de ésta dentro de los materiales geológicos subsuperficiales o formaciones.

Los geólogos denominan litosfera a la corteza terrestre. Cuando se refieren a la litología de una muestra de perforación, o de una sección a través de la corteza, están hablando de las clases de rocas que tienen lugar en una sucesión de capas o estratos situados por debajo de la superficie y que forman parte de la litosfera. Los geólogos denominan rocas a todos los materiales de la corteza terrestre, ya sean éstos no consolidados como las arenas y las arcillas o consolidados como el granito y la caliza.

A mayor o menor profundidad, todos los materiales de la corteza terrestre son normalmente porosos. Esta parte se denomina zona de fracturación. Los poros o aberturas de esta parte de la litosfera, pueden encontrarse parcial o totalmente saturados de agua.

El estrato superior, en donde las aberturas están sólo parcialmente llenas de agua, se denomina "zona de aereación". Inmediatamente por debajo de ésta, y en donde esas aberturas se hallan

completamente llenas de agua, está la "zona de saturación".

La zona de aereación se divide en tres franjas, a saber: la de humedad del suelo, la intermedia y la franja capilar. Estas varían en profundidad y sus límites no están definidos exactamente mediante diferencias físicas de los materiales geológicos. Lo que existe es una gradual transición de una a otra.

La franja de agua contenida en el suelo tiene particular importancia para la agricultura puesto que es la que suministra el agua necesaria para el crecimiento de las plantas. El agua que continúa su descenso por debajo de esta franja, se escapa del alcance de las raíces de la mayoría de las plantas. Su espesor varía de acuerdo con los tipos de suelos y de la vegetación y puede extenderse desde unos pocos metros hasta varios de ellos por debajo de la superficie del terreno.

En algunos casos las raíces de las plantas alcanzan la franja capilar y hasta la superficie de saturación, cuando éstas se hallan próximas a la superficie. Esto ocurre de preferencia en las áreas ribereñas. Tales plantas reciben el nombre de freatófitas que son independientes para su crecimiento, de la franja de humedad del suelo.

El agua utilizada por las plantas y contenida en la franja de humedad del suelo, es retenida en ésta mediante atracción molecular y acción capilar contra la fuerza de la gravedad. La atracción molecular tiende a retener agua en forma de una delgada película alrededor de cada partícula de suelo. La capilaridad lo hace reteniéndola en los pequeños espacios existentes entre las partículas. Solamente cuando una cantidad suficiente de agua ha entrado a esta franja como para satisfacer la capacidad retentiva de las fuerzas capilares, es que el agua empieza a percolar hacia abajo bajo la fuerza de la gravedad.

El agua que pasa a través de la capa de humedad del suelo llega a la franja

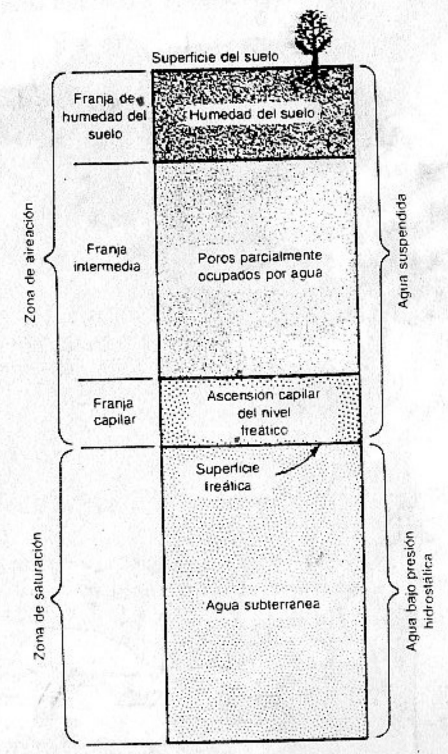


Fig. 10: El agua subterránea es aquella parte del agua subsuperficial contenida en la zona de saturación.

intermedia y continúa su descenso por acción gravitacional. Al igual que en la franja de humedad del suelo, la franja intermedia retiene agua suspendida por atracción molecular y capilaridad, siendo esta última la más importante de ambas fuerzas. El agua suspendida en esta franja constituye un almacenamiento fósil, puesto que no se puede recuperar para utilizarla. Su utilidad consiste únicamente en proveer al agua proveniente de la franja de humedad del suelo, un pasaje hacia la franja capilar y a la zona de saturación situada inmediatamente por debajo de aquélla. El espesor de la franja intermedia varía mucho, lo que tiene un efecto muy significativo en el tiempo que le toma al agua pasar a través de su espesor para recargar la zona de saturación.

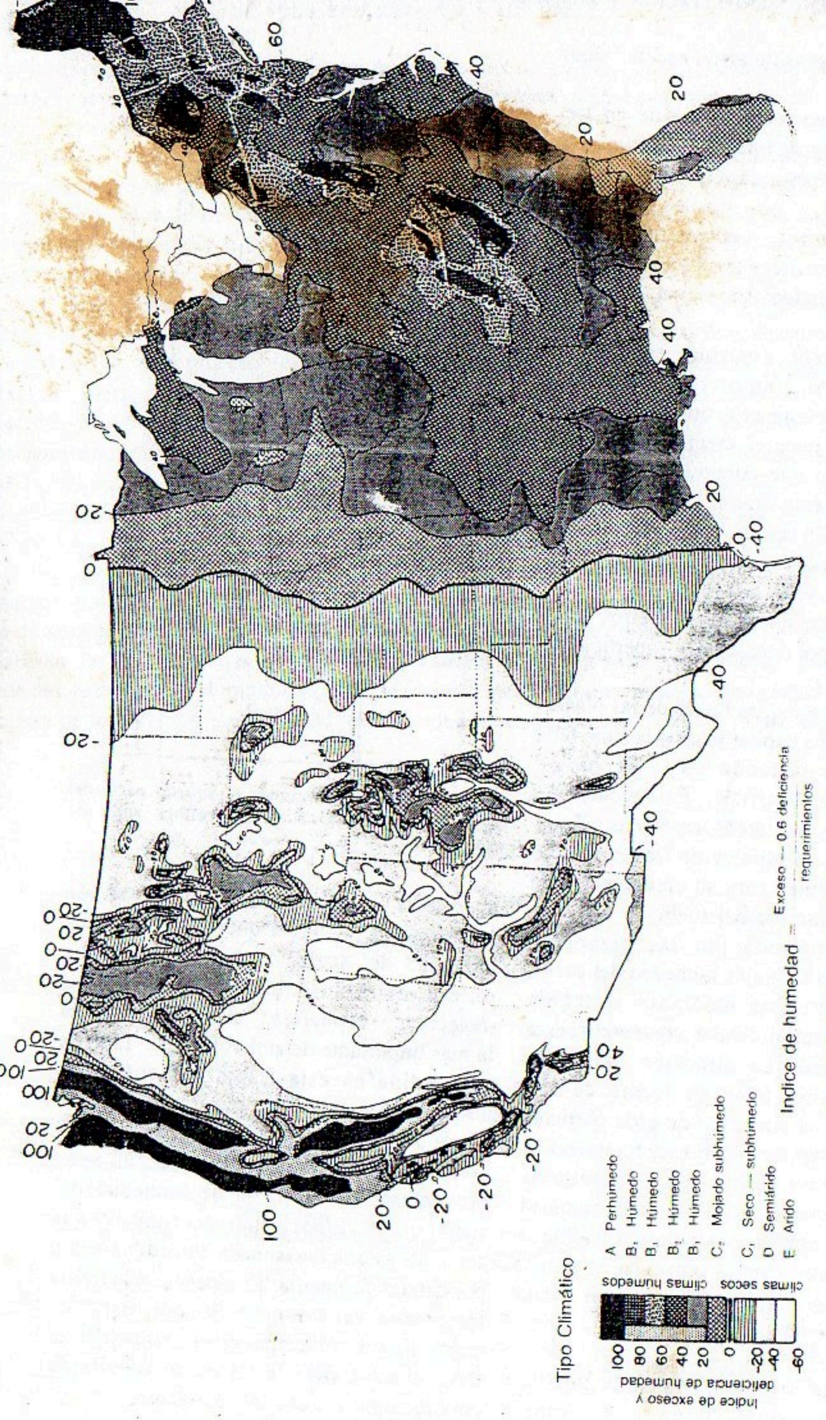


Fig. 11: Las zonas climáticas de los 48 estados continentales, tal como las ha clasificado C. W. Thornthwaite.

La franja capilar yace inmediatamente por debajo de la intermedia y encima de la zona de saturación. Retiene agua sobre esta última mediante fuerza capilar contrarrestando la acción de la gravedad. Su espesor y la cantidad de agua que retiene depende del tamaño de los granos del material.

En algunos materiales tales como limo y arcilla, la franja capilar alcanza a veces espesores de hasta 2.5 metros, en tanto que en arenas gruesas y en grava llega a ser de una fracción de centímetro.

Agua Subterránea

El agua contenida en la zona de saturación es la única parte de toda el agua del subsuelo de la cual se puede hablar con propiedad como *agua subterránea*. Otros términos empleados para definirla, son los de *Agua del subsuelo* y *Agua profunda*, pero se prefiere el de agua subterránea. La zona de saturación podría asimilarse a un gran embalse natural o sistema de embalses cuya capacidad total es equivalente al volumen conjunto de los poros o aberturas de las rocas que se hallan llenas de agua.

El agua subterránea se encuentra en forma de un solo cuerpo contínuo o también en estratos separados.

El espesor de la zona de saturación varía desde unos pocos metros hasta varios cientos. Los factores que determinan su espesor son tales como la geología local, la presencia de poros o intersticios en las formaciones, la recarga y el movimiento o desplazamiento del agua desde las área de recarga hasta las de descarga.

Agua Connata (o Singenética, o de Formación)

Una importante excepción del origen del agua subterránea según la descripción anteriormente dada, la constituye la presencia de agua marina vetusta en algunas formaciones sedimentarias.

Los intersticios o poros de los materiales que se sedimentaron sobre plataformas océanicas, quedaron saturados originalmente con agua del mar. Algunos de estos sedimentos emergieron por sobre el nivel del mar debido a procesos geológicos posteriores y de gran magnitud. El agua del mar atrapada en los poros de estos sedimentos fue también elevada por sobre la superficie océanica, conjuntamente con la formación que la contenía. El agua subterránea que se originó en esta forma se denomina "agua connata" o agua de formación o singenética.

Conforme continuó el ascenso del terreno, el agua salada comenzó a drenar y a escurrir bajo la influencia del gradiente hidráulico que se creó con ese ascenso. El agua dulce proveniente de la precipitación, percoló hacia abajo y fue sustituyendo al agua salada la que poco a poco era evacuada.

La contínua recarga de agua dulce fue expulsando más y más agua salada. En muchos casos el agua de mar original no ha sido aún esplazada del todo. Así pues, en algunas formaciones persiste aún el agua connata dentro de la zona de saturación.

Para una buena comprensión del agua subterránea como recurso natural, se hace necesario conocer las condiciones estructurales del subsuelo y los diversos factores que determinan la manifestación y el movimiento del agua dentro de las formaciones geológicas.

Se denominan acuíferos aquellas formaciones o estratos comprendidos dentro de la zona de saturación, de los cuales se puede obtener agua con fines utilitarios. Un *acuífero* es una unidad geológica saturada, capaz de suministrar agua a pozos y manantiales, los que a su vez sirven como fuentes prácticas de abastecimiento del líquido.

Otros términos que también se usan, en lugar del de acuífero, son los de *formación almacenadora* y *depósito de agua subterránea*. Para que una formación geológica pueda ser calificada de acuífero,

debe contener poros o intersticios llenos de agua y suficientemente grandes como para que permitan que el agua se desplace hacia pozos y manantiales a caudal apreciable.

Tanto el tamaño de los poros como el volumen total de éstos dentro de una formación, puede ser pequeño o grande, lo que depende del tipo de material. Los poros individuales de una formación constituida por granos muy finos como la arcilla, son extremadamente pequeños, pero el volumen de todos los poros combinados es generalmente grande. Como una formación arcillosa posee una gran capacidad de retención el agua no se desplaza fácilmente a través de los finos espacios abiertos. Esto significa que una formación arcillosa no brinda agua a los pozos y en consecuencia no constituye un acuífero no obstante hallarse saturada.

Algunos materiales más gruesos, tales como la arena, contienen grandes espacios abiertos a través de los cuales el agua se desplaza fácilmente. Una formación de arena saturada sí es un acuífero, porque está en capacidad de retener agua y transmitirla a caudal apreciable cuando tienen lugar diferencias de presión.

La superficie superior de la zona de saturación recibe el nombre de nivel freático. La conformación de la superficie freática depende en parte de la topografía regional y en términos generales tiende a seguir su conformación.

Condiciones de la Superficie Freática

En ciertos acuíferos, el agua subterránea se manifiesta bajo condiciones freáticas. Ello significa que el límite superior del acuífero queda definido por la superficie freática misma. En la superficie freática, o sea, el plano superior de la porción saturada de la formación geológia, el agua contenida en los poros del acuífero se encuentra sometida a presión atmosférica, tal como si estuviese contenida en un recipiente abierto.

En estas condiciones, el acuífero mismo se denomina acuífero freático. Otros términos que también se utilizan para definir este estado del agua subterránea, son los de acuífero no confinado, y agua subterránea libre.

En cualquier nivel dentro de un acuífero freático o libre, la presión hidrostática es equivalente a la profundidad que media desde la superficie libre hasta el punto en cuestión y puede expresarse en metros de agua.

Fig. 12: El agua freática colgada tiene lugar sobre un estrato impermeable y por encima de la superficie freática principal.

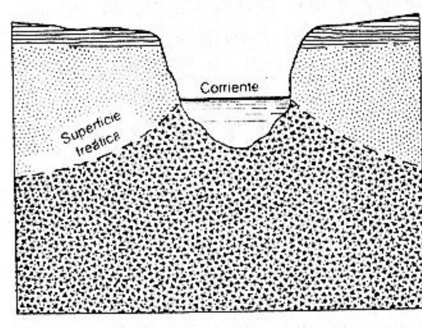
Así por ejemplo, una partícula de agua subterránea que se halle a una profundidad de 50 pies por debajo de la superficie freática, está sometida a una presión estática de 50 pies.

Cuando se perfora un pozo dentro de un acuífero freático, el nivel estático dentro del pozo se halla a la misma elevación que el nivel freático.

Algunas veces, puede existir una zona de saturación local cuyo nivel se halla por encima del nivel de saturación principal. Esta situación tiene lugar cuando algún estrato impermeable se halla intercalado dentro de la zona de aereación e interrumpe la percolación provocando que cierta agua subterránea se acumule en una área limitada, por sobre ese estrato. En tal caso, la superficie superior de tal acumulación de agua subterránea se denomina *superficie freática colgada*.

La superficie freática no es una superficie estacionaria, sino que fluctúa periódicamente, elevándose cuando más agua penetra hasta la zona de saturación por percolación vertical y descendiendo en períodos de sequía cuando el agua almacenada previamente drena hacia los manantiales, ríos, pozos y otros lugares de descarga.

La zona de saturación incluye tanto estratos permeables como impermeables de materiales terrestres. Los permeables constituyen acuíferos. Cuando un acuífero yace entre estratos impermeables situados por encima y por debajo, se dice que tanto el acuífero como el agua en él contenida, están confinados. Debido a la presencia del



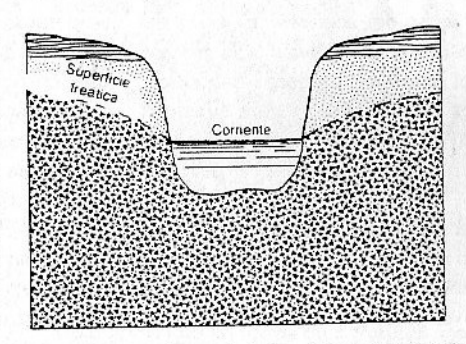
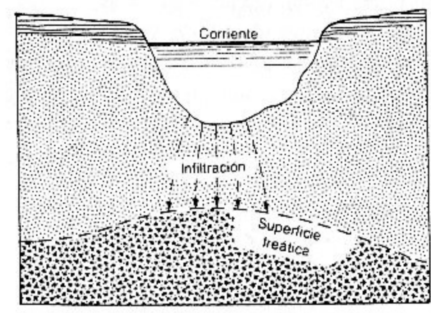


Fig. 13: La corriente afluente de la izquierda cede agua al acuífero; la efluente de la derecha recibe agua de éste, puesto que la superficie freática se encuentra por encima del lecho del río.



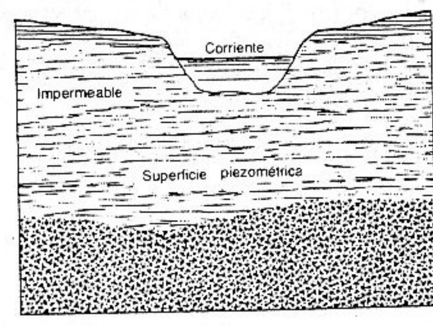


Fig. 14: La corriente de la izquierda, fluye solamente durante períodos de escorrentía, pero se seca durante las sequías. La de la derecha se encuentra aislada del acuífero artesiano que yace por debajo.

estrato confinante superior, el agua del acuífero no se encuentra expuesta a la presión atmosférica. Así pues, el agua se halla dentro de los poros del acuífero a una presión mayor que la atmosférica.

Condiciones de Artesianismo

Cuando el agua subterránea se encuentra en una situación tal, se dice que se manifiesta en condiciones de artesianismo o artesianas. El acuífero se denomina *acuífero artesiano*. Los términos *acuífero confinado* y *agua subterránea confinada* se aplican también para describir esta condición.

Cuando se perfora un pozo a través de un estrato confinante superior y se penetra dentro de un acuífero artesiano, el agua asciende por dentro del pozo hasta alcanzar algún nivel cuya elevación se halla por encima del techo del acuífero. El nivel del agua dentro del pozo equivale a la presión artesiana del acuífero. La carga hidráulica, expresada en pies de agua, y para cualquier punto dentro del acuífero, viene dada por la distancia vertical desde ese nivel al punto en cuestión.

La elevación a que ascendería el agua dentro de un pozo que penetrara dentro de un acuífero artesiano se define por el término técnico "nivel piezométrico". La *superficie piezométrica* viene a ser una superficie imaginaria que representa la presión o carga hidráulica existente dentro de una parte o de todo un acuífero artesiano. Esta superficie imaginaria es similar a la superficie líquida real que limita a un acuífero freático.

Algunas veces la presión hidrostática de un acuífero artesiano es suficientemente grande como para que el agua, dentro de un pozo, se eleve por encima del nivel del terreno. En estas condiciones tiene lugar un pozo surgente. En este caso, el nivel estático se halla por encima del terreno y se puede medir si el ademe del pozo se extiende lo suficiente hacia arriba impidiendo el flujo. Este nivel también puede medirse si se tapa la boca del ademe y se instala en el punto un manómetro.

Factores de la Infiltracion

Tal como se deduce de la explicación del ciclo hidrológico, la generación de agua subterránea viene a ser el resultado de la infiltración producida a través del suelo por ríos y lagos, los que a su vez reciben el agua mediante la precipitación de lluvia, nieve, granizo, rocío y escarcha.

En algunos lugares, los depósitos de agua subterránea son recargados rápidamente por la lluvia que cae en terrenos que yacen por encima de aquéllos. En otros sitios en que el nivel del agua de ríos y lagos se halla más alto que la superficie freática y sus lechos son permeables, el depósito es recargado por esos cuerpos líquidos. Cuando una corriente o un tramo de ésta brinda su contribución de agua a la zona de saturación, se dice que es una corriente *afluente* respecto del agua subterránea. Si por el contrario el agua subterránea se halla a una elevación superior a la de un río y percola hacia éste, se dice que la corriente es *efluente* de aquélla. Algunas secciones de una corriente superficial son afluentes en tanto que otras pueden ser efluentes.

La razón de recarga de un depósito de agua subterránea depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos. Asimismo, varía de acuerdo con la permeabilidad del suelo y de los otros materiales a través de los cuales debe percolar para alcanzar la zona de saturación.

La oportunidad de infiltrar depende en mucho de la condición del suelo, su contenido de humedad y de la duración de la lluvia y del patrón de drenaje en la cuenca. Asimismo, la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que las muy inclinadas favorecen la escorrentía superficial y, si son menos fuertes, retienen por más tiempo el agua favoreciendo la

infiltración. En algunas áreas pareciera que las pendientes moderadas ofrecen condiciones mejores para infiltración que las enteramente planas. Estas últimas desarrollan a menudo suelos herméticos. La textura del suelo juega entonces un papel muy importante en el proceso de infiltración puesto que está influida por la pendiente del terreno.

Una lluvia moderada de larga duración, favorece la infiltración. Las lluvias intensas saturan muy rápidamente el suelo, perdiéndose gran parte de éstas en escorrentía superficial. Estas lluvias también compactan el suelo reduciendo su habilidad para absorber el agua. La infiltración provocada por el deshielo, depende de si el subsuelo se halla congelado en ese momento.

La breve discusión anterior muestra que los factores que inciden en la infiltración de la precipitación y en la recarga natural del depósito de agua subterránea caen en dos grupos: uno que incluye el tamaño, la pendiente y otras características físicas de la cuenca, y el otro que comprende las condiciones climáticas, las cuales varían grandemente de estación a estación y de año a año.

La historia y procesos geológicos que han tenido lugar en una región determinada son los que han establecido la localización y el espesor de las formaciones acuíferas que hoy día encontramos bajo la superficie. El agua subterránea tiene lugar dentro de un marco geológico. Así pues, para poder aplicar los procedimientos más prácticos y económicos de obtención de agua subterránea de los varios acuíferos arenosos y rocosos, se requiere un adecuado conocimiento de geología.

Como excelente ilustración de la interrelación que existe entre la historia geológica y el origen del agua subterránea, describiremos la situación existente en las vecindades de la localidad de Paducah, en Kentucky, Estados Unidos*. Los detalles de un estudio hidrogeológico realizado en esta área constan en el Informe 1417 del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Este estudio fue realizado en forma cooperativa con la Comisión de Agricultura y Desarrollo de Kentucky.

Los resultados de tal estudio ponen de relieve ejemplos prácticos de los principios geológicos e hidrogeológicos que venimos discutiendo en este capítulo.

El área de Paducah abarca 155 millas cuadradas y está situada en el extremo occidental de Kentucky. La ciudad de Paducah está al norte del área y en la confluencia de los ríos Tennessee y Ohio.

Esta área se encuentra en la parte nororiental que los geólogos denominan "Ensenada de Mississippi", de la Planicie costera del Golfo. Esta unidad geológica es un cañón dentro de la roca que corre en sentido sur desde ese mismo extremo de

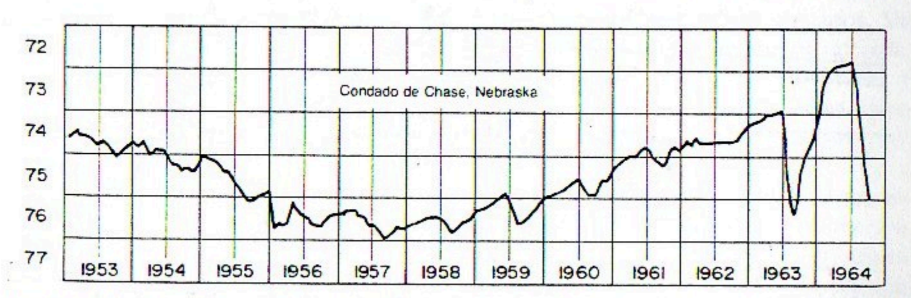


Fig. 15: La fluctuación de los niveles del agua en un pozo que se halle distante de áreas de bombeo, muestra el drenaje del acuífero durante los años secos y la recarga natural en aquellos de abundante precipitación.

Illinois hacia el Golfo de México. Este cañón ha sido rellenado con arena, arcilla y grava, materiales que fueron depositados sobre basamento rocoso a través de sucesivas épocas geológicas.

La Figura 16 muestra la localización del área de Paducah y el límite norte de la Ensenada de Mississippi. El cañón dentro de la roca se va profundizando hacia el sur a razón de 20 a 30 pies por milla.

El basamento rocoso está constiuído por calizas de Mississippi y por horsteno. El agua dulce está presente en las fisuras y diaclasas de la roca, pero no hay pozos en el área que hayan alcanzado el basamento rocoso, puesto que las formaciones arenosas suministran suficiente cantidad de agua.

El más antigüo de los materiales que fueron depositados en la roca es la formación denominada Ripley. Este fue depositado durante la época geológica conocida como Cretácico Superior.

La Figura 17 muestra en forma generalizada una sección transversal del área de Paducah en sentido noreste — sudoeste. La figura muestra también la sucesión de depósitos desde el basamento rocoso hasta la actual superficie del terreno.

En la época del Cretácico Superior el área de Paducah se hallaba situada cerca del

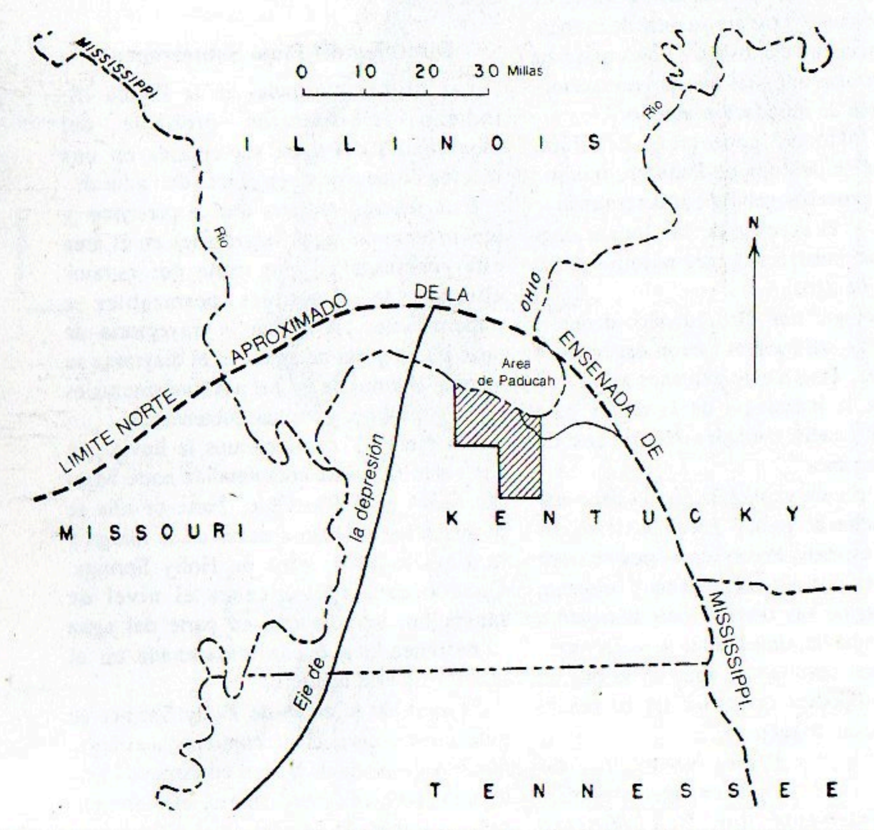


Fig. 16: Mapa que muestra la ubicación del área de Paducah en Kentucky, incluyendo la parte norte de la Ensenada de Mississippi en la Planicie Costera del Golfo. *Cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos.*

Tabla II
Sucesión Geológica del Area de Paducah

Eras	Períodos	Epocas	Formaciones del Area de Paducah
Cenozoica	Cuaternario	Reciente	Aluvión
		Pleistoceno	Aluvión Marga
	Terciario	Plioceno	Arena y Grava
		Eoceno	Arena de Holly Springs
		Paleoceno	Arcilla de Porters Creek
Mesozoica	Cretácico	Cretácico tardío	Formación Ripley
Paleozoica	Misisípico		Basamento

borde de un mar de poca profundidad. Así pues, las arenas, la arcilla arenosa y la arcilla calcárea que constituyen la formación Ripley fueron sedimentadas en agua marina. Las arenas así depositadas en este mar poco profundo, fueron movidas en vaivén por la acción de las olas. La estratificación cruzada de estas arenas, tal como hoy día se puede observar, es evidencia de lo anterior.

Historia Geológica del Area de Paducah

A finales del periodo Cretácico, la Ensenada de Mississippi emergió por sobre el nivel del mar. Así pues, la formación Ripley se convirtió en la superficie del terreno en el área de Paducah. El viento y la lluvia la erosionaron parcialmente reduciendo consecuentemente su espesor.

Posteriormente el mar cubrió de nuevo toda la Ensenada extendiéndose el agua hasta puntos tan lejanos como el norte y el sur de Illinois. Estos hechos ocurrieron durante una época que los geólogos denominan el período Paleoceno.

Durante este tiempo se depositó en el agua marina poco profunda una arena de coloración grisácea a negra con ocasionales estratificaciones de arena fina. Esta formación, cuyo espesor es de unos 60 metros en la mayor parte del área, recibe el nombre de arcilla de Porters Creek. El mar se retiró al final del Paleoceno quedando la superficie del terreno de nuevo expuesta a la erosión. En algunas partes ese mismo fenómeno eliminó todo el espesor de la arcilla de Porters Creek.

De nuevo el mar regresó durante el período siguiente que geológicamente recibe el nombre de Eoceno. Sin embargo, durante este período no llegó tan al norte ni alcanzó tanta profundidad como había ocurrido anteriormente. Arena, limo y arcilla arrastadas por las corrientes que fluían hacia el mar, fueron depositadas dentro de aguas poco profundas en forma de estratificaciones cruzadas e irregulares. Estas deposiciones constituyen la formación conocida como arena de Holly Springs.

Luego, algunas corrientes de moderado gradiente fueron depositando arcillas y limo fino dentro de las tranquilas aguas protegidas por barreras de playa que se formaron a lo largo de algunas partes de la costa. El follaje de los bosques que se encontraban a lo largo de la costa fue arrastrado hasta el agua y sepultado con la arcilla y el limo. Luego, como resultado de una pequeña subsidencia posterior, los lentes de arcilla y limo fueron cubiertos por arena. La rápida variación de las corrientes dió como resultado las gradaciones laterales y verticales de los

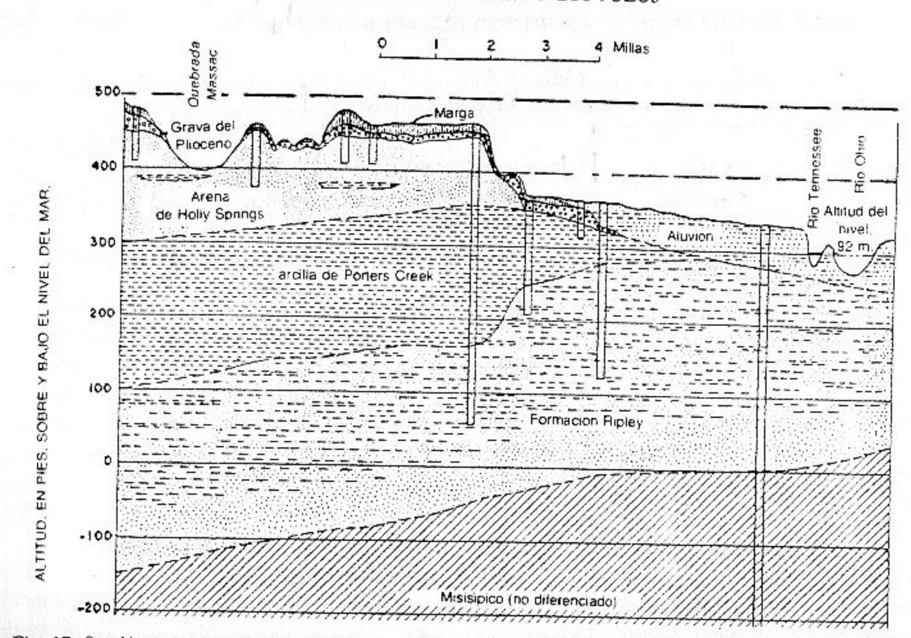


Fig. 17: Sección transversal generalizada en sentido nordeste del área de Paducah, en la que se muestra la sucesión de depósitos por encima del basamento. *Cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos.*

granos de estos depósitos. Estas condiciones prevalecieron hasta el final del período Eoceno cuando los terrenos emergieron del mar nuevamente como áreas de moderado relieve.

Nuevas deposiciones tuvieron lugar en esta área, una vez que los terrenos elevados aledaños, incluyendo los domos de Ozark y Nashville, sufrieron levantamientos. Estos terrenos elevados estaban formados por rocas de la misma edad que el basamento rocoso que se halla debajo de la ensenada. La roca se encontraba profundamente meteorizada (alterada) y el levantamiento apresuró la erosión de la superficie en los terrenos elevados. Una serie de corrientes migratorias de alta velocidad y entrecruzadas arrastró grava y arena de los terrenos elevados, depositándolas como canales en la ensenada. Posteriormente, éstas fueron esparcidas por los antiguos ríos Tennessee, Ohio-Cumberland y Mississippi y cubrieron el área entera de la ensenada.

La formación que así se creó se denomina Gravas y Arenas de la edad Pliocena.* Las erosiones posteriores redujeron el espesor de estos depósitos en muchos lugares y en algunos otros los eliminaron completamente. La Figura 17 nos muestra que relativamente sólo quedaron pequeños remanentes antes de que fueran cubiertos por los materiales que hoy día forman la superficie del terreno.

Fuentes de Material Aluvional

Las formaciones superiores en el área de Paducah están asociadas con la época que los geólogos denominan período Pleistoceno. Durante el Pleistoceno, los grandes glaciares constituídos por mantos continentales de hielo, avanzaron y retrocedieron alejándose hacia el norte. Ninguno de ellos llegó tan al

*Obsérvese que en las Figuras 17 y 18, la edad de la grava y la arena se indica como Plioceno (?). Esta designación significa que los geólogos no están completamente seguros de la edad de estos depósitos, pero asumen que su deposición tuvo lugar durante el período Plioceno.

sur como se halla Paducah. Sin embargo, el limo, la arena y la grava fueron arrastrados por las corrientes que se formaron al derretirse los glaciares. Estas fueron depositadas en el valle ocupado hoy día por el Río Ohio, y llegaron a constituir la formación que se muestra como aluvión en la Figura 17. Casi al mismo tiempo, el viento arrastró material limoso fino hasta el área de Paducah y lo depositó en el suelo. Este material se denomina marga. Constituye un depósito fino y uniforme, el cual forma un delgado manto sobre la mayor parte del área. Una porción de su espesor original ha sido removida por la erosión.

Desde la deposición del aluvión y de la marga el Río Ohio ha horadado a través de estos depósitos y hoy día su área de inundación se encuentra a unos 8 u 11 pies más baja que las terrazas antigüas que son remanentes de otra área de inundación anterior.

Esta historia geológica de fácil interpretación del área de Paducah, muestra cómo los procesos geológicos determinan la extensión y el espesor de las formaciones que son tan importantes para nosotros como depósitos de agua.

La Geología nos dice cuándo, dónde y qué clase de sedimentos fueron depositados en una área. Pero a esto debemos agregar el estudio de la hidrología de la región para obtener un cuadro verdadero del recurso de agua subterránea.

Alguna acción geológica podría depositar una formación de arena y grava de cientos de metros de espesor. Pero si en el área no tiene lugar la precipitación o ésta es muy pequeña, y si además no hay ríos que desemboquen o crucen en aquélla, únicamente se almacenará una pequeña cantidad de agua en lo que de otra forma podría constituir un tremendo depósito de agua subterránea.

La formación Ripley en el área de Paducah fue depositada en agua del mar. Consecuentemente fue originalmente saturada con agua salada. El agua dulce de la lluvia y de las corrientes superficiales percoló a través de los materiales terrestres depositados encima. Esta agua dulce lavó el agua salada que originalmente llenó los poros de la arena y nos proporcionó el importante depósito de agua subterránnea que se está utilizando hoy en día.

El estudio de la hidrología de una área significa esbozar en detalle su ciclo hidrológico local. La Figura 18 muestra el diagrama del ciclo hidrológico del área de Paducah.

Normalmente, el agua subterránea se halla en movimiento dentro de los acuíferos. Su dirección y velocidad varía de un lugar a otro, dependiendo de la geología, de las condiciones de recarga y de los puntos de descarga.

Dirección del Flujo Subterráneo

Las flechas mostradas en la Figura 18, indican la dirección probable del movimiento del agua subterránea en una sección de sur a norte en el área de Paducah.

Esta sección muestra que la presencia y movimiento del agua subterránea en el área está gobernada en gran parte por estratos alternos de materiales permeables e impermeables. Al trazar la trayectoria de unas pocas gotas de agua, en el diagrama se revelan algunos de los hechos fundamentales de la hidrología de aguas subterráneas.

Por ejemplo, consideremos la lluvia que cae sobre la colina comprendida entre Massac Creek y el Río Ohio. Parte de ella se desplaza hacia abajo a través de la marga y la grava hasta la arena de Holly Springs. Cuando esta agua alcanza el nivel de saturación, se convierte en parte del agua subterránea que queda almacenada en el interior de este acuífero.

El agua de la arena de Holly Springs se mueve tanto hacia el sur como hacia el norte desde la divisoria de las dos corrientes. Parte de ella fluye en sentido norte, encontrando paso a través de la grava del Plioceno y luego del aluvión y finalmente descarga en el Río Ohio.

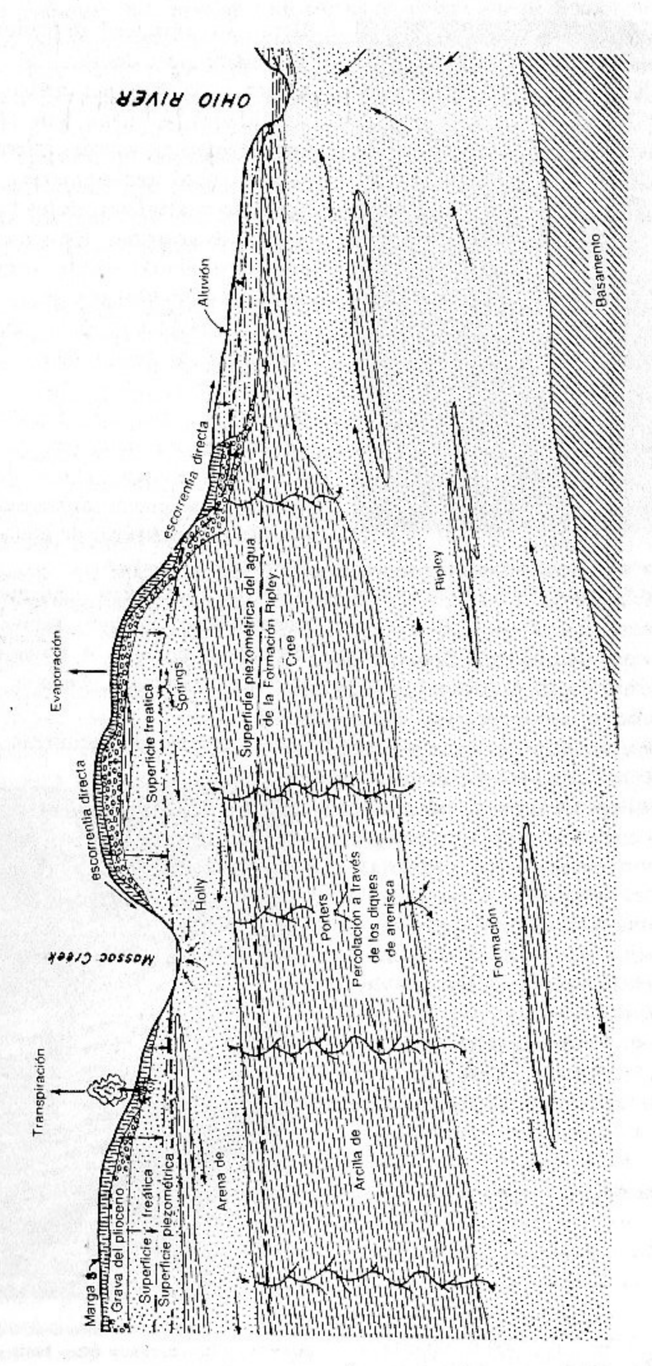


Fig. 18: Ciclo hidrológico del área de Paducah en el que se muestran las direcciones probables del desplazamiento del agua subterránea en varios puntos de la sección norte — sur. *Cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos.*

Del agua que se desplaza al sur en la arena de Holly Springs, una parte percola dentro de Massac Creek. Obsérvese que la superficie freática se halla a un nivel superior al de la quebrada, lo que causa la descarga de agua subterránea en ésta.

Gran parte del flujo de agua subterránea en dirección sur, pasa por debajo de Massac Creek y prosigue en la misma dirección por debajo de los extensos lentes arcillosos. El agua subterránea bajo estos lentes queda confinada por el techo impermeable arcilloso porque tanto los lentes como el acuífero que se halla por debajo de éstos mantiene una pendiente hacia el sur. En esta forma, el agua contenida en la parte inferior de la arena de Holly Springs se dice que se encuentra bajo condiciones artesianas.

La línea marcada "superficie piezométrica" representa la presión artesiana de la formación. Si se perforase un pozo a través de los lentes arcillosos hasta alcanzar la arena inferior, el agua se elevaría dentro de aquél hasta el nivel indicado por la superficie piezométrica.

El agua que se encuentra en la parte superior de la arena de Holly Springs y por encima de los lentes de arcilla, proviene de la lluvia que cae en los terrenos elevados al sur de Massac Creek. Esta agua se halla colgada sobre la arcilla. Se desplaza hacia el norte con lentitud y percola dentro de la quebrada.

Recarga de la Formación Ripley

Siguiendo la Figura 18, vemos que una parte del agua en la arena de Holly Springs encuentra su camino descendente a través de la arcilla de Porters Creek hasta la formación Ripley. Esto último merece una explicación.

La arcilla de Porters Creek no brinda agua a los pozos, pero es importante puesto que constituye un estrato confinante que yace sobre la formación Ripley.

La formación Porters Creek contiene fracturas bien desarrolladas a ángulo recto. A través de éstas, se puede percolar agua. La formación también contiene pequeños diques de arenisca de unos cuantos centímetros de espesor. Estos últimos son el resultado de la intrusión de arena entre las fisuras y fracturas abierta por movimientos tectónicos.

El agua que percola a través de la arcilla de Porters Creek y viene a recargar la formación Ripley, proviene de los acuíferos emplazados en la arena de Holly Springs y del aluvión de más arriba. La línea que representa la superficie piezométrica de la formación Ripley en la Figura 18 indica su presión artesiana.

Las Diferencias de Presión Causan Flujo

La distancia comprendida desde el nivel freático hasta la superficie piezométrica de la formación Ripley, es la carga hidrostática necesaria para que se produzca percolación a través de la arcilla de Porters Creek. Esta pérdida de carga o caída de presión equivale a la resistencia por fricción que el agua experimenta en su movimiento a través de las pequeñas aberturas de la formación arcillosa.

El desplazamiento del agua subterránea dentro de la formación Ripley es sensiblemente horizontal y en dirección a puntos de descarga natural o artificial. En la mitad derecha de la Figura 18 se aprecia el flujo de sentido norte hacia el Río Ohio.

Lo anterior tiene lugar puesto que, como lo indica la superficie piezométrica, la presión en esta parte de la formación Ripley se halla por encima del nivel normal del río. Cuando el Río Ohio alcanza niveles de crecida probablemente la dirección del flujo subterráneo se invierta, y el agua del cauce del río recargue la formación Ripley.

En la porción izquierda de la Figura 18, el flujo subterráneo dentro de la formación Ripley se dirige hacia abajo a puntos más distantes de descarga natural.

Si se perforasen pozos grandes a lo largo de la ribera del rio, estos harían descender la

presión artesiana local en la medida en que se produciría abatimiento al bombearlos. Esta descarga artificial de agua subterránea desde la formación Ripley, podría causar también una inversión del flujo local, dando como resultado que el agua del río recargaría al acuífero.

Al sur de Massac Creek, se podrían perforar pozos en tres diferentes acuíferos, y en cada caso el nivel del agua sería distinto.

Un pozo somero que sólo alcanzara los lentes de arcilla, trabajaría en condiciones freáticas o libres. El agua que se bombeara de éste se obtendría de la parte superior de la arena de Holly Springs.

Un segundo pozo algo más profundo que alcanzara el fondo de la arena de Holly Springs y tuviera su ademe hermético en el intervalo de los lentes de arcilla, sería un pozo artesiano no surgente. El nivel del agua subiría por dentro del ademe hasta la superficie piezométrica mostrada sobre los lentes arcillosos.

Otro pozo aún más profundo que se llevase hasta la fomación Ripley y con su ademe completamente hermético en el intervalo de la arcilla de Porters Creek, sería también un pozo artesiano no surgente. El nivel del agua en este pozo se hallaría a unos 30 metros por encima del techo de la formación Ripley.

El estudio del área de Paducah muestra cómo las ciencias geológica e hidrogeológica actúan como un todo para llegar a la comprensión y entendimiento de los recursos de aguas subterráneas.

En cualquier estudio de los recursos de agua subterránea de una región, es necesario describir la presencia y el movimiento del agua por debajo de la superficie del terreno, la recarga del depósito subterráneo, las áreas de descarga natural de cada formación, la temperatura y la calidad del agua y la magnitud del uso que se hace de ésta. La información anterior permitirá una apropiada aplicación de técnicas para un desarrollo adicional y un racional uso del recurso disponible.

Las Formaciones Geológicas como Acuíferos

El agua subterránea tiene lugar tanto en materiales rocosos consolidados (roca dura) como en materiales sueltos no consolidados (roca suave). Cualquier tipo de roca, sedimentaria, ignea o metamórfica ya sea consolidada o no consolidada, puede constituir un acuífero si es suficientemente porosa y permeable.

Las rocas sedimentarias constituyen un cinco por ciento de la corteza terrestre, pero contienen alrededor del 95 por ciento del agua subterránea. Se hallan apliamente distribuídas y son poseedoras de excelentes propiedades acuíferas. Los materiales que se han ido depositando como sedimentos, se derivan tanto de la meteorización como de la erosión de las rocas preexistentes. La deposición puede tener lugar tanto en el océano como en la parte continental. Las formaciones sedimentarias incluyen tanto rocas duras como rocas suaves.

Un prototipo de roca sedimentaria dura es la caliza, constituída esencialmente por carbonato de calcio. La dolomita es una roca sedimentaria relacionada que contiene considerable cantidad de carbonato de calcio y magnesio. La mayoría de las calizas y dolomitas contienen muy poco o nada de aberturas conectadas cuando se acaban de formar como sedimentos marinos. Los movimientos tectónicos producen luego fracturas y fisuras, penetrando el agua hasta estas aberturas y bajo ciertas condiciones va disolviendo lentamente un poco de la roca. La acción anterior agranda algunas de las aberturas hasta formar canales por disolución. Cuando estos canales hechos por disolución se llegan a desarrollar, estas rocas duras proporcionan grandes cantidades de agua a los pozos.

Las arenas y las arcillas que han sido transportadas por los ríos hasta depositarlas en el océano, han llegado a desarrollar otras clases de rocas sedimentarias duras. Conforme capa tras capa de estas arenas y arcillas se fueron depositando, el peso de los materiales llegó a compactar las arenas y endureció las arcillas hasta transformarlas en lutitas. La deposición de materiales cementantes en los vacíos de las capas de arena, durante y luego del proceso de compactación, las endureció hasta convertirlas en areniscas. Las lutitas y otros materiales similares denominados limolitas, no constituyen buenos acuíferos. Pueden suministrar, en ciertas áreas, pequeñas cantidades de agua para pozo cuando han sufrido fracturas por movimientos tectónicos.

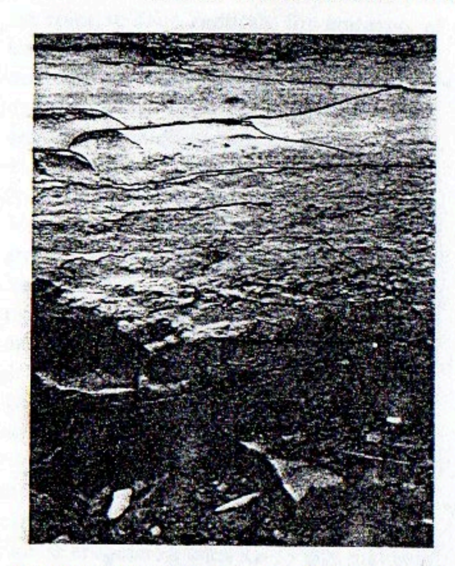


Fig. 19: Las fracturas crean porosidad en lo que de otro modo sería una caliza densa e impermeable.

La arenisca indica una deposición cerca de la costa y en un ambiente marino. Esencialmente está constituída por sílice (cuarzo) que usualmente no tiene color. La amplia gama de colores visibles en las areniscas, se debe a los varios agentes que cementaron los granos para formar la roca dura. Su capacidad de ceder agua varía grandemente debido al grado de cementación. Las que rinden las mayores cantidades de agua son las areniscas parcialmente cementadas y fracturadas.

Las rocas sedimentarias suaves que constituyen acuíferos, incluyen arena, grava y mezclas de ambas. Estas rocas granulares no consolidadas varían ampliamente de tamaños de partículas y grado de acomodo, con la consecuente gran variación de su capacidad de rendir agua. Consideradas globalmente, son nuestros mejores acuíferos. En los Estados Unidos, suministran más agua a los pozos que todos los demás acuíferos juntos. Estas rocas se hallan ampliamente distribuídas y poseen buenas características de almacenamiento y transmisión de agua.

Otros acuíferos sedimentarios no consolidados, incluyen depósitos marinos, depósitos aluviales o fluviales, abanicos aluviales, acarreos glaciares y arenas de duna.

Las propiedades acuíferas de las rocas

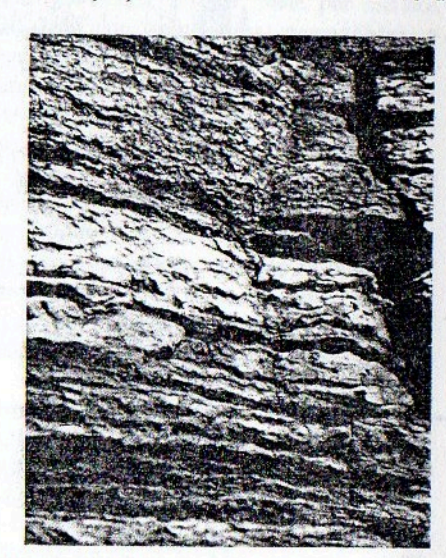


Fig. 20: El flujo subterráneo dentro de las fracturas de una caliza, agranda éstas hasta convertirlas en canales de disolución.

sedimentarias están influidas por muchos factores. La meteorización es uno de los importantes, que incluye tanto el proceso mecánico (desintegración) como el químico (descomposición). Si en la roca dura predomina la desintegración, el sedimento resultante será de textura gruesa. Si el factor predominante es la descomposición, una gran parte del sedimento estará formado por limo y arcilla.

En los climas fríos y áridos y cuando las pendientes de los terrenos son pronunciadas, la desintegración pareciera ser el proceso de meteorización principal. En cambio, la descomposición es más corriente en los climas calientes y húmedos en donde las pendientes del terreno son moderadas.

El tipo de la roca madre, la forma de transporte, la distancia de acarreo y el medio ambiente de deposición, son factores que en ciertos casos pueden ser más influyentes que la meteorización. Por ejemplo, la desintegración de la lutita produce sedimentos de grano fino debido a la naturaleza de la roca madre. Consecuentemente, un depósito que se derive de lutita, no será un buen acuífero. Como contraste, aquellos sedimentos que se deriven del granito o de otras rocas cristalinas, formarán buenos acuíferos de arena y grava.

Rocas Igneas

Las rocas ígneas se forman cuando los materiales derretidos calientes (magma) que se originan a grandes profundidades dentro de la tierra, se enfrían y solidifican. El magma que fluye sobre o cerca de la superficie del terreno se denomina lava. Debido a su relativo rápido enfriamiento, la solidificación de las coladas de lava produce roca vidriosa y de textura fina.

Cuando los materiales derretidos se solidifican a grandes profundidades por debajo de la superficie del terreno, su enfriamiento es más lento y la roca que resulta es de textura gruesa. Estas últimas se denominan rocas *intrusivas* o *plutónicas*.

Las rocas plutónicas por lo general no son porosas, pero en algunos lugares producen pequeñas cantidades de agua subterránea. La parte superior en donde el material ha sido meteorizado, contiene las únicas aberturas que éstas presentan, en forma de fisuras y fracturas.

Los materiales expulsados por una chimenea volcánica se conocen como rocas *extrusivas* o *volcánicas*. Se incluyen también en esta clase de rocas ígneas, las coladas solidificadas de lava y las cenizas y escorias que son lanzadas en forma de materiales granulares.

La lava basáltica es una las principales rocas volcánicas. Las aberturas que ésta contiene son por lo general grietas y fracturas. En algunas ocasiones se han desarrollado rocas de alta porosidad debido a la formación de burbujas de aire conforme la lava se enfría. Un ejemplo muy patente de esto se ha descubierto al norte del Río Snake, en Idaho. Así pues, los acuíferos basálticos contienen agua en sus fisuras, vesículas interconectadas (aberturas debidas a burbujas de aire) y zonas brechosas de las sucesivas capas.

Las cenizas y las escorias, que son materiales fragmentarios eruptados por los volcanes, se denominan *piroclásticos* dentro de la familia general de las rocas volcánicas. Estas partículas varían desde un polvo fino hasta grandes bloques. Los depósitos constituidos por estos materiales se estratifican en forma compleja y su permeabilidad varía de lugar a lugar. Los depósitos de ceniza y escoriáceos constituyen excelentes acuíferos y se encuentran en América Central y en otros sitios.

Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas son aquéllas que incluyen materiales sedimentarios e ígneos que a su vez han sido alterados por presión y

por calentamiento. Bajo ciertas condiciones, la arenisca se convierte en cuarcita; la lutita puede transformarse en pizarra y luego convertirse en esquistos de mica; el granito se vuelve gneis. Por lo general, estas rocas no son buenos acuíferos. Solamente se puede obtener alguna agua de las fracturas y grietas que se forman en la parte superior de la formación geológica en donde el material se ha meteorizado. La única excepción la constituye el mármol, que es una caliza que ha sufrido metamórfosis. Es un material más duro que la caliza, pero cuando se fractura viene a constituir un buen acuífero, especialmente si se han desarrollado canales por disolución.

Los Procesos Geológicos Originan Acuíferos

Los procesos geológicos crean rocas y acuíferos, pero a su vez otros procesos posteriores los pueden destruir. Nuevas rocas se forman y se extienden sobre las anteriores en una sucesión de capas. Una vez que cualquier roca sedimentaria, ígnea o metamórfica queda constituida, los continuos eventos geológicos la alteran de varias maneras, lo que eventualmente mejora o daña sus propiedades acuíferas.

Dentro de la escala de tiempos geológicos, se puede decir que ciertos cambios tienen lugar rápidamente. En la escala de tiempo del hombre, aquéllos ocurren tan despacio, que son difícilmente perceptibles. Pero hay montañas que están siendo levantadas o bajadas, valles que se están rellenando o profundizando, costas que avanzan o retroceden y también se están creando acuíferos y destruyendo otros.

Las rocas que forman la corteza terrestre se han venido acumulando desde tiempos inmemoriales. Su historia ha sido reunida pieza por pieza por los geólogos mediante el estudio de los fósiles que se han encontrado atrapados en su seno. La Tabla III que sigue muestra las más importantes divisiones de tiempo y de estratigrafía que utiliza el Servicio Geológico de los Estados Unidos.

El agua subterránea tiene lugar en rocas de todas las edades, desde la más antigua denominada Pre-Cámbrica hasta la más joven que se clasifica dentro de la Epoca Reciente. En términos generales, las rocas recientes constituyen mejores acuíferos que los materiales antiguos. La razón consiste en que las rocas antiguas son más susceptibles de estar sepultadas, comprimidas y cementadas, procesos que han reducido su porosidad y su permeabilidad.

Los acuíferos ostentan una variedad de formas y estructuras. Algunos depósitos marinos de arenisca se extienden sobre grandes áreas, son de textura uniforme y la variación de su espesor es muy poca. Otras areniscas marinas se presentan como depósitos costeros lenticulares y discontinuos con una pobre interconexión hidráulica. Las calizas, que excepto en pocos casos, son depósitos marinos, aparecen en forma de extensas formaciones. Sus características de ceder agua varían grandemente de un lugar a otro debido al grado de fracturación de la roca y al agrandamiento de las fracturas por disolución que depende de las condiciones locales.

La lava basáltica constituye un importante acuífero en las islas de Hawaii y en la parte noroccidental de los Estados Unidos. El agua se halla en las grietas, fracturas, vesículas interconectadas (aberturas dejadas por burbujas de aire) y brechas y meteorizaciones de las partes superior e inferior de los estratos de roca. No se puede predecir fácilmente la capacidad de ceder agua de los basaltos debido al carácter tan variable de sus aberturas. Pozos situados a corta distancia entre sí, pueden diferir mucho en cuanto a sus rendimientos.

Las disyunciones y las fracturas de ciertas rocas metamórficas tales como el granito, el gneis y la cuarcita, rinden algunas veces pequeñas cantidades de agua. Los acuíferos

Tabla III — Tiempos Geológicos

Era	Periodo o Sistema Rocoso	Epoca	Serie Rocosa	Duracion Estimada Años	Años Desde El Comienzo
Cenozoica	Cuaternario	Epoca reciente	Reciente		10 a 25.000
		Pleistoceno	Pleistoceno	1 millón	1 millón
	Terciario	Plioceno	Plioceno	12 millones	13 millones
		Mioceno	Mioceno	12 millones	25 millones
		Oligoceno	Oligoceno	11 millones	36 millones
		Eoceno	Eoceno	22 millones	58 millones
		Paleoceno	Paleoceno	5 millones	63 millones
Mesozoica	Cretácico	Cretácico tardío	Cretácico superior		
		Cretácico reciente	Cretácico inferior	62 millones	135 millones
	Jurásico	Jurásico tardío	Jurásico superior		
		Jurásico reciente	Jurásico inferior	46 millones	181 millones
	Triásico	Triásico tardío	Triásico superior		
		Triásico reciente	Triásico inferior	49 millones	230 millones
Paleozoica	Pérmico	Pérmico tardío	Pérmico superior		
		Pérmico reciente	Pérmico inferior	50 millones	280 millones
	*Pensilvánico	Pensilvánico tardío	Pensilvánico superior		
		Pensilvánico medio	Pensilvánico medio		
		Pensilvánico reciente	Pensilvánico inferior	65 millones	
	*Misisipico	Misisipico tardío	Misisipico superior		
		Misisipico reciente	Misisipico inferior		345 millones
	Devónico	Devónico tardío	Devónico superior		
		Devónico medio	Devónico medio	60 millones	
		Devónico reciente	Devónico inferior		405 millones
	Silúrico	Silúrico tardío	Silúrico superior		
		Silúrico medio	Silúrico medio	20 millones	
		Silúrico reciente	Silúrico inferior		425 millones
	Ordovísico	Ordovísico tardío	Ordovísico superior		
		Ordovísico medio	Ordovísico medio	75 millones	
		Ordovísico reciente	Ordovísico inferior		500 millones
	Cámbrico	Cámbrico tardío	Cámbrico superior		
		Cámbrico medio	Cámbrico medio	100 millones	
		Cámbrico reciente	Cámbrico inferior		600 millones
	Precámbrico	Se emplean localmente subdivisiones informales		Más de 3 mil millones	

* Se consideran como subdivisiones del Sistema Rocoso Carbonífero.

presentes en estos tipos de rocas no aparentan un tamaño o forma particulares, pero el agua subterránea generalmente tiene lugar cerca de la parte superior de la formación. La cantidad y el tamaño de las aberturas disminuye rápidamente conforme aumenta la profundidad. Sería un desperdicio de tiempo, esfuerzo y dinero tratar de perforar más de unos cuantos metros en este tipo de materiales.

A lo largo de las costas del Atlántico y del Golfo de los Estados Unidos, aparece un cierto número de formaciones de arena no consolidada que fueron depositadas bajo

condiciones marinas. Estas tienen un moderado buzamiento hacia el océano. En términos de tiempo geológico, no fue sino recientemente que fueron elevadas por sobre el nivel del mar, y las porciones inferiores de tales acuíferos aún contienen agua salada connata o de formación (singenética). Los acuíferosn son extensos y de espesor muy uniforme.

Sedimentos Terrestres

Los sedimentos terrestres, son aquellos materiales depositados sobre el terreno. Estos incluyen depósitos de origen fluvial, lagunar, glacial y eólico. Si se comparan con los depósitos marinos, estos resultan generalmente discontinuos y mucho menos extensos. En los Estados Unidos, la formación de Ogallala constituye una excepción de lo anterior, la cual cubre una extensión de por lo menos 135.000 millas cuadradas, y se extiende desde Dakota del Sur hasta Texas. La formación Ogallala es el resultado del crecimiento conjunto de materiales aluvionales depositados por varias corrientes superficiales que han transportado el producto de la erosión de las Montañas Rocosas hacia el este. Aunque la formación es de considerable extensión, su capacidad de rendir agua varía mucho de un sitio a otro, debido a que en el término de cortas distancias su textura difiere considerablemente. Las variaciones de textura tanto en la dirección vertical como en la horizontal, son características de la formación.

Los acuíferos que se han formado por depósitos aluviales o fluviales, son por lo general largos y angostos. Constituyen usualmente los materiales subsuperficiales que se hallan por debajo del lecho del valle y en el valle del río propiamente dicho. Estos depósitos aluviales y fluviales se encuentran también en las terrazas situadas sobre el lecho del valle. Vienen a ser residuos escalonados de las épocas en que el río fluía a una elevación superior. También se encuentran esos depósitos aluviales y fluviales en valles abandonados cuyas corrientes cambiaron de curso. Los materiales aluvionales depositados por un río a lo largo de un curso abandonado, pueden ser posteriormente sepultados bajo un manto de depósitos glaciales o de origen eólico quedando poca evidencia que indique la presencia del valle original. El material

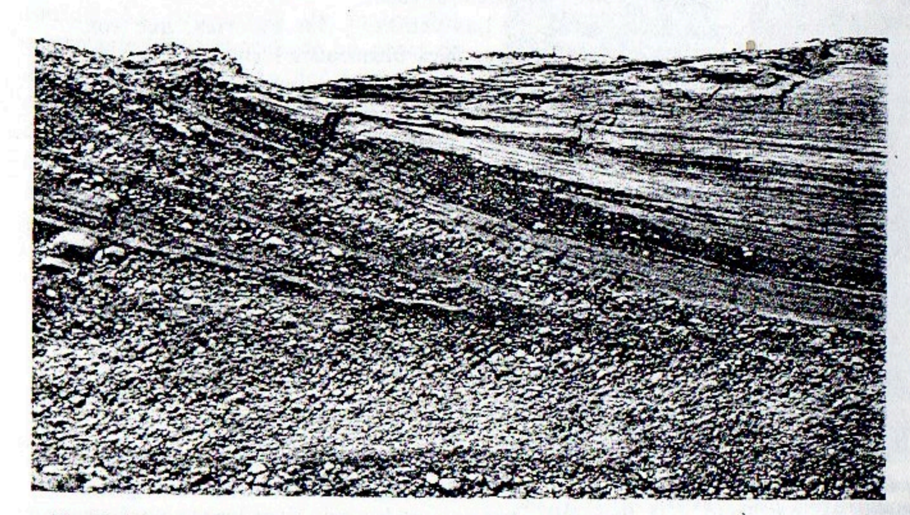


Fig. 21: Arena y grava estratificada en que se observa la intercalación de capas finas y gruesas.

correspondiente a los acuíferos aluvionales varía en tamaño de partículas desde la arena fina hasta la grava gruesa y cantos rodados.

Un tipo especial de depósito fluvial lo constituye un abanico aluvial. Este es depositado al pie de una montaña en donde la pendiente del terreno se aplana. Cuando una corriente que fluye muy rápidamente montaña abajo tropieza con un cambio abrupto de gradiente, la velocidad de flujo disminuye súbitamente y el agua deposita gran parte del material que arrastra. La carga que el agua arrastra está formada por la erosión previa del material contenido en las pendientes superiores de la montaña. Como resultado de esto, se depositan grandes delantales de material al pie de la pendiente, esparciéndose por alguna distancia sobre el terreno más plano. Los sedimentos más gruesos quedan en la base de la montaña; los más finos son arrastrados más lejos, pero se detienen gradualmente conforme la velocidad decrece.

Acuíferos de Origen Glacial

Numerosos acuíferos de origen glacial son de importancia en la región central norte de los Estados Unidos, en el sur del Canadá, y en el norte de Europa y Asia. Los glaciares de montaña, para distinguirlos de los continentales, tienen lugar en áreas montañosas de otras regiones y son los responsables de la formación de depósitos glaciales más localizados.

Estos depósitos tienen varios tamaños y formas. Consisten de arcilla, limo, arena, grava y cantos rodados. Los acuíferos de estos depósitos se caracterizan por su discontinuidad o falta de interconexión. Algunos son largos, sinuosos, angostos, de forma espiral. Otros son de forma laminar, debido a las grandes cantidades de arena y grava que se depositaron como material de arrastre. Este arrastre está formado por material granular que se desprende del glaciar mediante las corrientes que se forman al derretirse aquél. Estos depósitos de arrastre son de carácter similar al de las arenas aluvionales. Los mejores acuíferos que se hallan en los restos de glaciares, son los materiales de arrastre depositados por las corrientes producto del derretimiento.

Los depósitos lacustres varían ampliamente de espesor, forma y extensión. Puesto que son el producto de una sedimentación de material granular en agua tranquila, su textura es fina. Estos depósitos solamente son buenos acuíferos cuando su espesor es considerable.

Las Funciones de un Acuífero

Dos son las funciones importantes que realiza un acuífero, a saber: una función almacenadora y otra transmisora. Este almacena agua, sirviendo como depósito y transmite agua como lo hace un conducto. Las aberturas o poros de una formación acuífera sirven tanto de espacio para almacenamiento como de red de conductos. El agua subterránea se mueve constantemente a través de distancias extensas y desde las áreas de recarga hacia las de descarga. El desplazamiento es muy lento, con velocidades que se miden en metros por día y a veces en metros por año. Como consecuencia de ello y del gran volumen que su porosidad representa, un acuífero retiene enormes cantidades de agua en almacenamiento inestable.

La discusión previa ha expuesto que las aberturas en las formaciones geológicas subsuperficiales son de tres clases generales:

1. Aberturas comprendidas entre las partículas individuales, como en las formaciones constituídas por arena y grava.
2. Fisuras, disyunciones o fracturas en las rocas duras, y que se han desarrollado al quebrarse éstas.
3. Canales de disolución y cavernas en las calizas, y aberturas resultantes de la contracción y de la evolución de los gases en las lavas.

Los dos propiedades de un acuífero que tienen relación con su capacidad de almacenar agua, son su porosidad y su rendimiento específico.

Porosidad

La *porosidad* de un acuífero es aquella parte de su volumen que consiste de aberturas o poros, o sea, la proporción de su volumen *no* ocupada por material sólido. La porosidad es un índice que indica cuánta agua puede ser almacenada en el material saturado. La porosidad se expresa generalmente como un porcentaje del volumen bruto de material. Por ejemplo, si un metro cúbico de arena contiene 0.30 metros cúbicos de espacios abiertos o poros, se dice que su porosidad es de 30 por ciento.

Aunque la porosidad representa la cantidad de agua que un acuífero puede almacenar, no nos indica cuánta de aquélla puede ceder.

Cuando un material saturado drena agua mediante la fuerza de la gravedad, únicamente cede una parte del volumen total almacenado en él[12]. La cantidad de agua que un volumen unitario del material deja escapar cuando se le drena por gravedad, se denomina *rendimiento específico*.

Aquella parte del agua que no se puede remover por drenaje gravitacional, es retenida, contra la fuerza de la gravedad, por capilaridad y atracción molecular. La cantidad de agua que un volumen unitario de material retiene cuando se somete a drenaje por gravedad, se denomina *retención específica*. Tanto el rendimiento específico como la retención específica se expresan como fracciones decimales o porcentajes. El rendimiento específico sumado a la retención específica, es igual a la porosidad.

Si se drenan 0.10 metros cúbicos de agua de un metro cúbico de arena saturada, el rendimiento específico de ésta es de 0.10 o 10 por ciento. Si asumimos que la porosidad de la arena es de 30 por ciento, entonces su retención específica es de 0.20 o sea 20 por ciento.

Un acuífero freático que se extienda sobre una área de 20 millas cuadradas, con un espesor promedio de 40 pies ocupa un volumen de 22.3 millones de pies cúbicos. Si su porosidad es de 25 por ciento este depósito de agua subterránea contendrá en sus poros 5.6 millones de pies cúbicos de

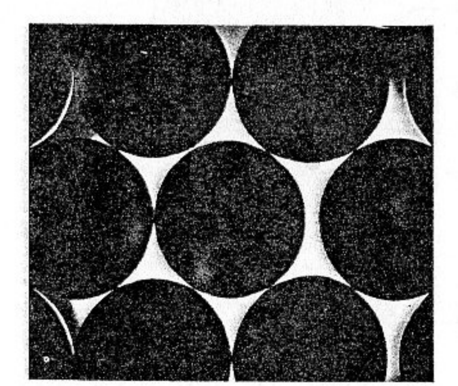
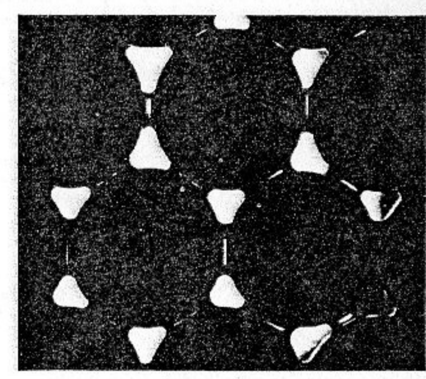



Fig. 22: Poros y puntos de contacto en una masa de esferas antes de ser humedecida. Después de saturarla y dejarla drenar por gravedad, parte del agua es retenida por capilaridad en una zona adyacente a los puntos de contacto y se presenta como una película que humedece la superficie de cada esfera. *Cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos.*

agua subterránea. Si el rendimiento específico del material fuera de un 10 por ciento, y se drenaran los 5 pies superiores del acuífero al abatir éste en una cantidad igual, el rendimiento total que este depósito daría sería de unos 280 millones de pies cúbicos de agua.

Esta cantidad de agua sería suficiente para alimentar a 4 pozos que se estuvieran bombeando a 700 galones por minuto continuamente, durante 12 horas al día y a través de 1042 días, lo que equivale a casi tres años. Esta extracción por bombeo estaría garantizada por la cantidad de agua subterránea almacenada en los 5 pies superiores del acuífero con ausencia total de recarga durante ese periodo de tres años.

Este ejemplo tan sencillo nos muestra cómo la función de almacenamiento que desarrolla un acuífero hace posible la utilización del agua subterránea a razón constante aunque la recarga de aquél sea intermitente e irregular. En este aspecto, los depósitos subterráneos pueden resultar más eficientes que los embalses superficiales dada su enorme capacidad.

Permeabilidad

La propiedad de una formación acuífera en lo referente a su función transmisora o de conducto, se denomina *permeabilidad*. La permeabilidad se define como la capacidad de un medio poroso para transmitir agua. El movimiento del agua de un punto a otro del material tiene lugar cuando se establece una diferencia de presión o carga entre dos puntos. La permeabilidad se puede medir en el laboratorio anotando la cantidad de agua que fluye a través de una muestra de arena en un tiempo dado y bajo una diferencia determinada de presión.

Henri Darcy fue el ingeniero francés que investigó el flujo del agua a través de lechos filtrantes de arena y publicó sus hallazgos en 1856. Sus experimentos demostraron que el flujo de agua a través de una columna saturada de arena, es proporcional a la diferencia de las cargas hidrostáticas en los extremos de la columna e inversamente proporcional a la longitud de la misma. Esto es lo que se conoce como la Ley de Darcy. Aún hoy en día continúa en uso como el principio básico que gobierna el flujo de agua subterránea.

Su expresión matemática es la siguiente:

$$V = P \frac{h_1 - h_2}{l}$$

en la cual V es la velocidad de flujo. $(h_1 - h_2)$ es la diferencia de cargo hidráulica. l es la distancia a lo largo de la trayectoria del flujo entre los puntos en donde se mide h_1 y h_2 y P es una constante que depende de las características del material poroso a través del cual tiene lugar el flujo de agua.

Por definición, la diferencia de carga hidráulica $(h_1 - h_2)$ dividida por la distancia, l, a lo largo de la trayectoria del flujo, es el gradiente hidráulico, I, de tal modo que

$$V = P\,I.$$

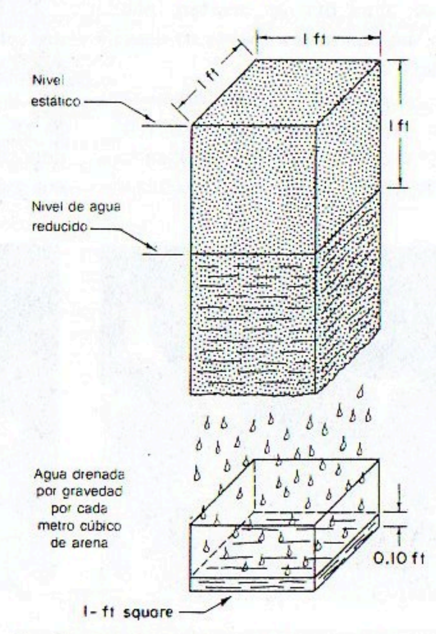


Fig. 23: En el diagrama se visualiza el rendimiento específico de una arena. Su valor en este caso es de 0.10 pies cúbicos de agua, por cada pie cúbico del material acuífero.

Generalmente, la cantidad de flujo o caudal es de mayor interés para nosotros que la velocidad, por lo que la Ley de Darcy se puede escribir en forma más conveniente mediante la expresión:

$$Q = AV = P\,I\,A$$

en la cual A es el área de la sección transversal a través de la cual se desplaza el agua y Q es el volumen de agua por unidad de tiempo, o caudal, en por ejemplo, metros cúbicos por día.

En las ecuaciones anteriores, P se denomina el *coeficiente de permeabilidad* del material poroso. Su magnitud depende, en el caso de una formación no consolidada, del tamaño y acomodo de las partículas, y del tamaño y carácter de la superficie de hendeduras, fracturas o aberturas por disolución, en una formación consolidada. Asimismo, puede cambiar según varíen las anteriores características. El coeficiente de permeabilidad viene a ser la cantidad de agua que puede fluir a través de una sección transversal de área unitaria dentro de un material poroso, por unidad de tiempo y bajo un gradiente hidráulico de 1.00 (100 por ciento) a una temperatura dada.

Por ser de uso más práctico en problemas de pozos, P se expresa como el flujo en galones por día a través de una sección transversal de un pie cuadrado de material acuífero y bajo un gradiente hidráulico de 1.00 a la temperatura de 60°F. La unidad de permeabilidad expresada con estas dimensiones se denomina una unidad Meinzer, en memoria del Dr. O. E. Meinzer, del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

El coeficiente de permeabilidad también puede expresarse en el sistema métrico utilizando unidades tales como litros por día por metro cuadrado bajo un gradiente hidráulico de 1.00 y a la temperatura de 15.5°C.

El término "permeabilidad" es utilizado por muchas personas en lugar del coeficiente de permeabilidad, y con igual significado se usará en las restantes páginas de este libro.

Ya hemos dicho que el flujo de un punto hacia otro está siempre relacionado con la diferencia de presión que exista entre ambos puntos. Esta diferencia de presión es el resultado de la resistencia por fricción que se desarrolla entre los poros del material cuanto tiene lugar el flujo. El gradiente hidráulico es la pérdida de carga expresada en metros de agua por cada metro de longitud de trayectoria a través del material.

La Ley de Darcy nos expresa que el flujo dentro de una arena saturada varía directamente con el gradiente hidráulico. Si



Fig. 24: Una grava uniforme tiene alta porosidad, gran rendimiento específico y alta permeabilidad. Los granos transparentes son de cuarzo y los oscuros de feldespato.

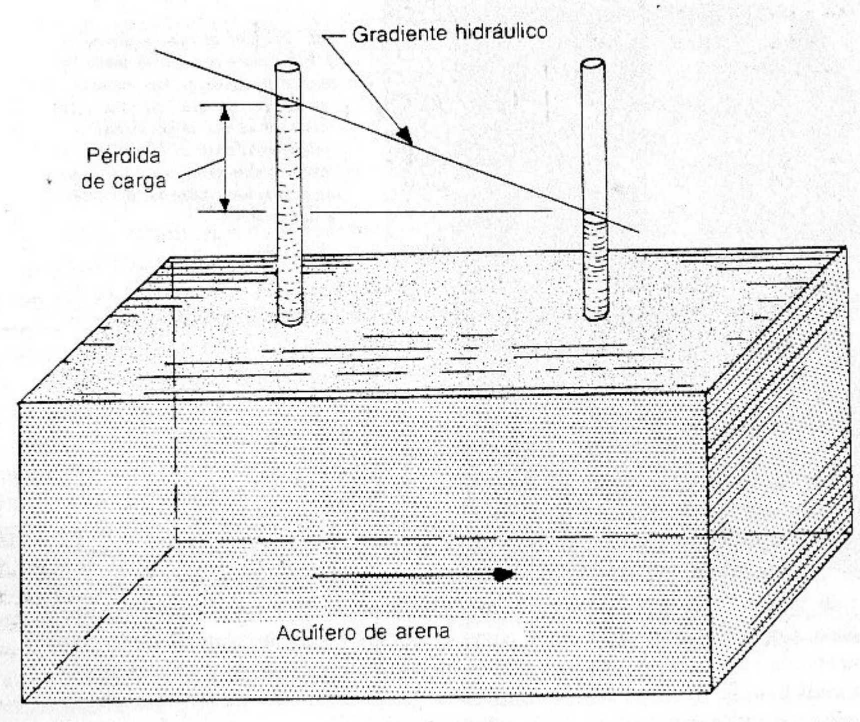


Fig. 25: Para que se establezca flujo a través de un medio poroso, se necesita que existan tanto una perdida de carga como un gradiente hidráulico. El caudal es proporcional, en una arena, al gradiente hidráulico. El gradiente es la pérdida de carga entre dos puntos, divida por la distancia entre estos.

el gradiente hidráulico (pérdida de carga por metro de longitud de trayectoria) se duplicara, el flujo a través de una arena dada también se duplicaría. Ello significa que para duplicar la razón de flujo en una arena dada, se hace necesario duplicar la magnitud del gradiente hidráulico.

El tipo de flujo líquido descrito mediante la Ley de Darcy, se conoce como flujo laminar. El agua que fluye a través de tubería puede tener régimen laminar a velocidades bajas, pero por lo general circula bajo condiciones conocidas como turbulentas. En el régimen de flujo turbulento el caudal no varía en proporción directa con el gradiente hidráulico, pues al duplicar la magnitud de éste, solamente aumenta el caudal una y media veces.

La pendiente de la superficie freática o la de la superficie piezométrica constituye el gradiente hidráulico bajo el cual se manifiesta el flujo subterráneo. El caudal total que pasa a través de una sección transversal vertical de acuífero se puede calcular si se conocen su espesor, su ancho, su coeficiente promedio de permeabilidad y la magnitud del gradiente hidráulico en la sección. El flujo, q, a través de cada metro de ancho de la sección viene dado por:

$$q = P\ m\ I$$

expresión en la cual P es el coeficiente promedio de permeabilidad del material desde el límite superior hasta el fondo del acuífero, m es el espesor de éste y I es el gradiente hidráulico.

En 1935, C. V. Theis puntualizó la conveniencia de utilizar el producto de P por

m para representar así en un sólo término la capacidad transmisora de agua de todo el espesor del acuífero. Así se introdujo el término *coeficiente de transmisividad*, que se define como la razón de flujo en metros

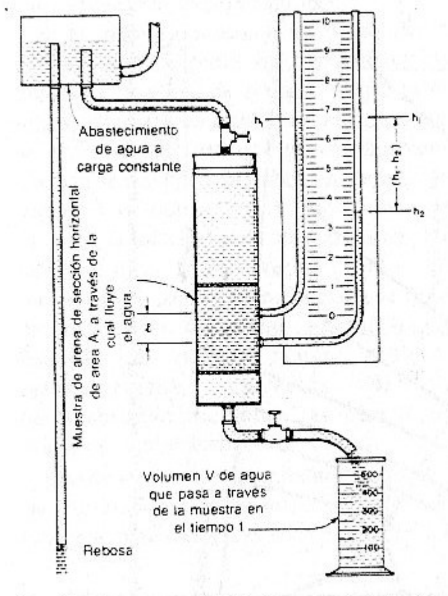


Fig. 26. La permeabilidad se puede calcular conociendo el caudal, el área de la sección transversal de la muestra y el gradiente hidráulico, en el ensayo mediante un permeámetro de carga constante.

cúbicos por día a través de una sección transversal vertical de acuífero, cuya altura es igual a su espesor y cuyo ancho es de un metro. La temperatura involucrada en esta definición es igual a la temperatura prevaleciente del agua en el acuífero.

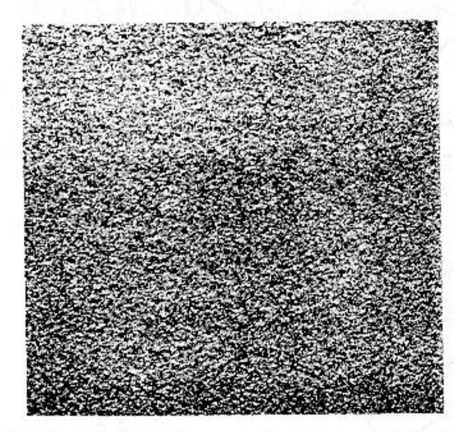
Cuando el coeficiente T de transmisividad se introduce en la ecuación de Darcy, el flujo a través de cualquier sección transversal vertical de acuífero viene expresado por

$$Q = T\ I\ W$$

en la cual T es el coeficiente de transmisividad, I es el gradiente hidráulico y W es el ancho de la sección vertical a través de la cual tiene lugar el flujo.

Tal como se verá luego en el Capítulo 6, el coeficiente de transmisividad puede determinarse mediante ensayos de bombeo. Este procedimiento práctico elimina el problema de obtener valores confiables del coeficiente medio de permeabilidad mediante pruebas de laboratorio. La inexactitud está siempre presente en los resultados obtenidos en el laboratorio, puesto que las muestras no representan el estado natural de la formación de donde fueron obtenidas.

Sabemos bien que las formaciones constituídas enteramente por materiales



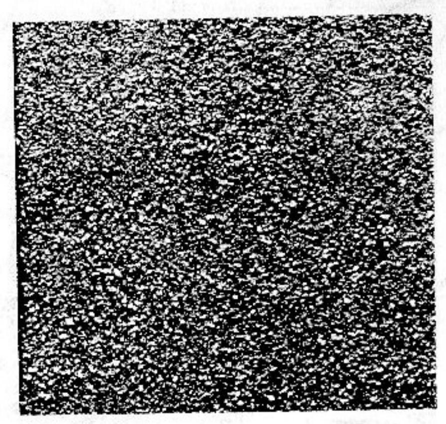


Fig. 27: Las arenas finas y medias tienen alrededor de la misma porosidad, en tanto que en un material más grueso la porosidad es mayor debido a que los poros individuales son más grandes.

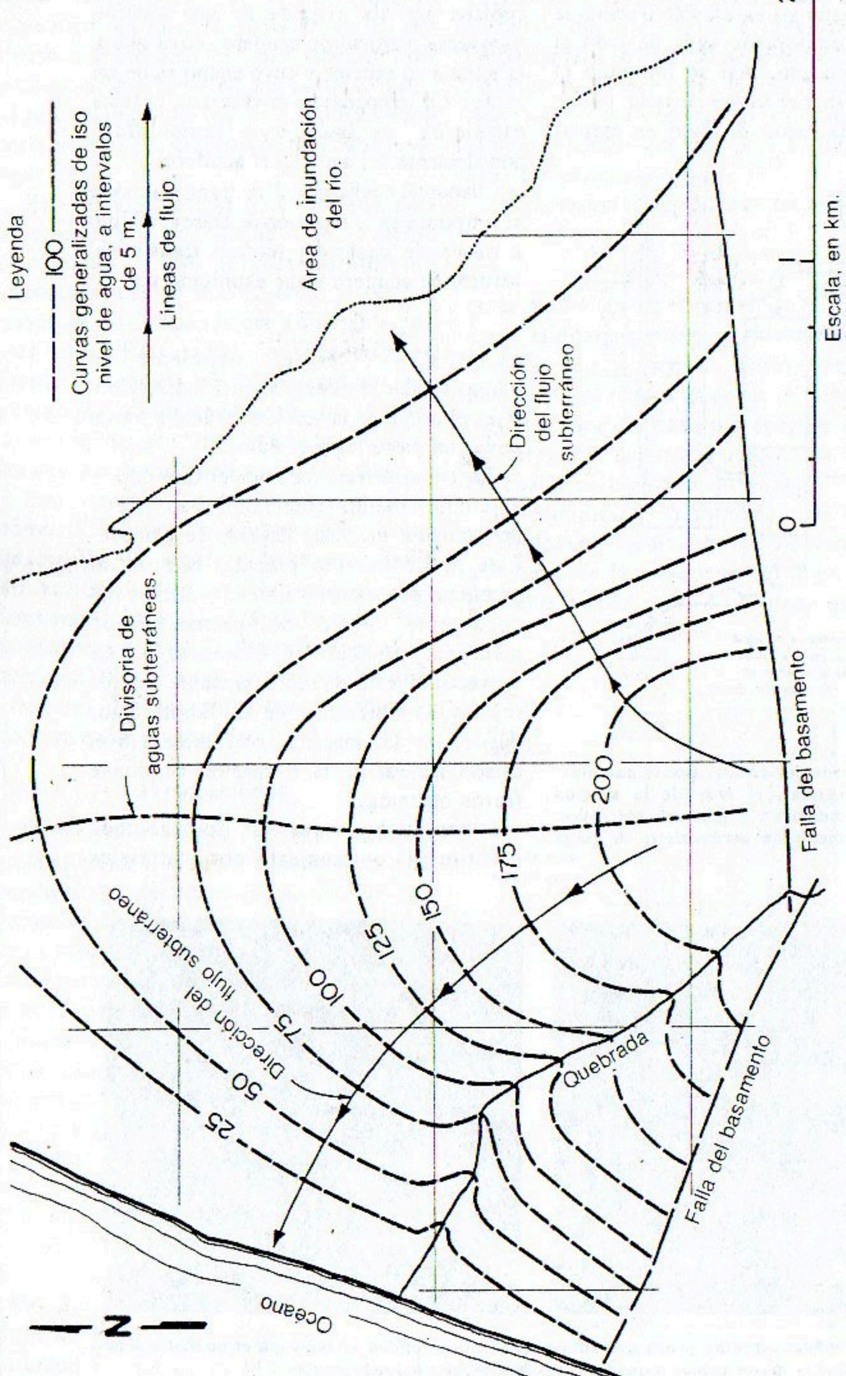
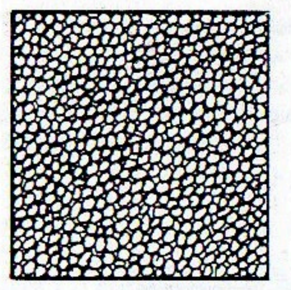


Fig. 28: Mapa de curvas isofreáticas en que se muestra la elevación de la zona de saturación. El agua subterránea fluye gradiente abajo a ángulo recto con las curvas, tal como lo indican las dos línea de flujo trazadas.



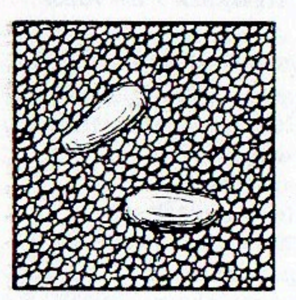


Fig. 29: Los granos grandes de grava embebidos en la masa de arena desplazan un volumen igual de arena porosa. El resultado es que la porosidad y la permeabilidad se reducen al compararlas con las de la arena de gradación uniforme mostrada a la izquierda.

gruesos y no consolidados, proporcionan grandes rendimientos de agua a los pozos que se construyan en ellas. Sus poros o vacíos son grandes debido a la presencia de tamaños grandes de las partículas presentes en tales formaciones. Los poros más grandes presentan menor resistencia al flujo que los más pequeños de las arenas finas, de tal suerte que una mayor cantidad de agua fluirá a través de cada metro cuadrado de la formación más gruesa, bajo una diferencia de presión dada. Lo anterior equivale a decir que la permeabilidad del material grueso es mayor que la del fino.

Estudios de Permeabilidad en el Laboratorio

Las pruebas de laboratorio de una arena fina y de otra gruesa indican que, manteniendo otros factores constantes, el efecto del tamaño de las partículas es determinante de la permeabilidad. Como ejemplo, veamos el caso de una arena gruesa con un tamaño medio de grano de 0.018 pulgadas, cuyo ensayo arrojó un valor del coeficiente de permeabilidad de 1,500 galones por día por pie cuadrado. Por otra parte, una arena fina de un tamaño medio de grano de 0.009 pulgadas, tenía un coeficiente de permeabilidad de solamente 300 galones por día y por pie cuadrado.

En ambos casos, la porosidad era la misma, 35 por ciento de vacíos. Aunque el volumen total de vacíos era el mismo, los pequeños poros de la arena fina causaron una mayor resistencia al flujo, tal como lo evidencia el menor valor de la permeabilidad.

Resulta difícil discutir el efecto del tamaño de la partícula en la permeabilidad sin discutir el aspecto de la uniformidad en la gradación de la arena, puesto que el grado de uniformidad en una mezcla de materiales finos y gruesos influye notoriamente en la capacidad transmisora del material. Cuando una arena consiste de partículas de casi el mismo tamaño, se dice que el material posee una gradación uniforme. Aquellas mezclas con un rango muy amplio de tamaño desde lo fino a lo grueso, no tienen gradación uniforme.

Una arena de gradación uniforme posee una mayor porosidad que una mezcla de materiales finos y gruesos de menor uniformidad. En las mezclas de finos y gruesos, la porosidad queda reducida al ocupar los finos aquellos espacios comprendidos entre las partículas gruesas. Como resultado de ello, se obtiene un acomodo más compacto y un reducido volumen de vacíos. La permeabilidad de la mezcla más densa es por lo general más baja que la de la fracción de finos eliminando las partículas gruesas.

Los materiales de gradación más uniforme manifiestan una mayor permeabilidad no obstante su menor tamaño de partículas.

Esta situación se muestra en la Figura 29, en donde se observa cómo la introducción de un poco de material grueso reduce la porosidad y la permeabilidad.

Una cierta arena acuífera consistente de

partículas de tamaño uniforme de grano, exhibe una alta porosidad (Figura 29 a la izquierda). Si se introduce dentro de la masa un grano de grava, su volumen sólido desplazará la arena porosa, con la consecuencia de que la porosidad total queda reducida. En correspondencia, la permeabilidad también se reduce puesto que no existen aberturas dentro de la partícula sólida a través de las cuales el agua pudiera moverse. La arena uniforme es luego más permeable que la mezcla no uniforme.

Cierta investigación que se realizó referente a la permeabilidad de las mezclas de arena y grava, demostró que cuando el contenido de grava es de alrededor de 20 por ciento, la permeabilidad de la mezcla es mucho menor que la de la porción de arena excluída la grava. En estas pruebas se consideró que la fracción de arena era la correspondiente a todo el material más fino que la malla 4, (0.185 pulg); la fracción de grava correspondía a aquellos granos más gruesos que la malla 4.

Con base en esta serie de ensayos, podemos describir en los términos generales siguientes, el efecto producido por diversas cantidades de grava y arena. Hasta un contenido de 20 por ciento de grava, sus partículas se dispersan dentro de la porción de arena. Como no se tocan entre ellas, no forman vacíos entre sí, pero hacen que la mezcla tenga una gradación más amplia. La permeabilidad se reduce y es considerablemente menor que la de la porción de arena sola. Conforme la cantidad de grava aumenta del 20 por ciento, la gradación se hace menos uniforme. Con cierto aumento del contenido de grava, tiene lugar una interferencia variable entre las partículas más gruesas, y la permeabilidad puede aumentar o disminuir en comparación con la de la mezcla que tiene un 20 por ciento de contenido de grava. La condición descrita se presenta cuando el contenido grava de la mezcla fluctúa dentro del rango de 20 a 65 por ciento.



Fig. 30: Una masa no uniforme o de pobre acomodo, de arena, grava y pepitas, tiene una baja porosidad.

Cuando el contenido de grava sobrepasa del 65 por ciento se manifiesta una mayor interferencia entre las partículas más gruesas; esto es, muchas de las partículas gruesas hacen contacto entre sí y crean vacíos relativamente grandes entre ellas mismas. Como estos vacíos no se hallan enteramente llenos de arena, la porosidad aumenta y la permeabilidad se incrementa súbitamente.

Este y otros ensayos realizados con mezclas de varios tamaños de partículas, demuestran que el carácter de los poros de una arena afecta su permeabilidad. La permeabilidad varía de acuerdo con factores tales como el tamaño, distribución y continuidad de los poros como también con la porosidad total. Tanto el limo como la arcilla y otros materiales cementantes pueden rellenar parcial o completamente los vacíos presentes en una arena y volverla casi impermeable. Aún cuando se encuentran en pequeñas cantidades, estos materiales cohesivos pueden aislar muchos de los

poros; aunque no rellenen los poros, algunos de los pasajes presentes en la arena quedan entonces parcialmente interconectados. Se ha observado con frecuencia que pequeñas cantidades de limo y arcilla reducen apreciablemente la permeabilidad.

Se ha intentado repetidas veces calcular la permeabilidad a partir del tamaño de los granos de muestras de arena, o lo que es lo mismo, mediante el empleo de las curvas que se obtienen del análisis granulométrico. Cuando se trata de materiales uniformes, de buena distribución, tales como arenas filtrantes o materiales de formación de una localidad dada, se ha obtenido algún éxito. Sin embargo, para una amplia gama de tipos de arena no se ha logrado desarrollar una fórmula que permita obtener valores razonablemente correctos de la permeabilidad mediante las curvas de análisis granulométrico.

Una de las razones importantes de por qué han fracasado estas fórmulas, es la de que solamente una arena puede ser aglomerada a diferentes densidades. Esto significa que la porosidad de la arena varía dependiendo de la forma en que se aglomere. Además, esta variación tiene lugar independientemente del análisis granulométrico. Puesto que la porosidad es un factor que afecta la permeabilidad, resulta obvio que al calcular esta última considerando tan sólo el tamaño del grano, se está haciendo caso omiso de otra importante variable como lo es la porosidad del material.

Los cálculos basados en los resultados del análisis por mallas, ignoran también el efecto producido por la forma de los granos y por el carácter físico y químico de la superficie de los mismos. No obstante, las pruebas directas de laboratorio revelan que esos dos últimos factores son menos importantes que el tamaño del grano y la porosidad.

La Figura 31 muestra las curvas granulométricas de tres materiales uniformes y bien distribuídos. Cada uno de estos tres materiales tiene una gradación artificial y

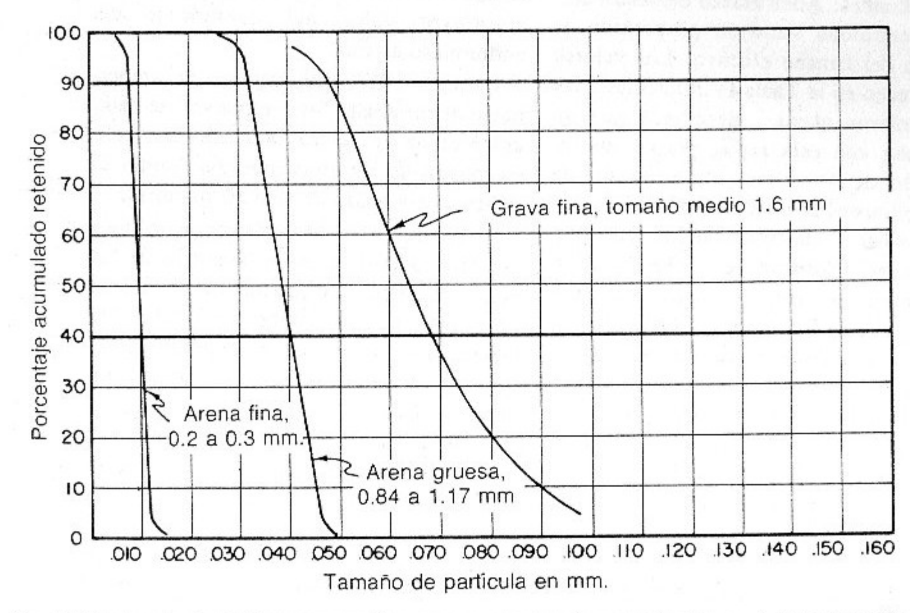


Fig. 31: Curvas granulométricas correspondientes a tres muestras de material uniforme, de buen acomodo y de gradación artificial. Tales materiales se utilizan como arenas filtrantes o filtros de grava en los pozos.

Tabla IV
Comparación de Arenas Filtrantes

	Arena Fina 0.2 a 0.3 mm	Arena Gruesa 0.84 a 1.17 mm	Grava Fina 1.17 a 2.36 mm
Tamaño efectivo en mm	0.2	0.86	1.22
Coeficientes de uniformidad	1.2	1.2	1.4
Permeabilidad en m^3/m^2/día	22	392	530
Porosidad en por ciento	37	37	35

son más uniformes que la mayoría de las gravas y arenas naturales.

La Tabla IV ofrece el tamaño efectivo, el coeficiente de uniformidad* y la permeabilidad de cada uno de los materiales a que se refieren las curvas de la Figura 31. Las permeabilidades se evaluaron mediante pruebas de flujo en el laboratorio.

Se puede observar en la Tabla IV que el tamaño efectivo de la arena gruesa es algo mayor de 4 veces el de la arena fina en tanto que su permeabilidad es alrededor de 18 veces más grande. En sus experimentos con arenas filtrantes, Allen Hazen demostró que la permeabilidad varía en proporción al cuadrado del tamaño efectivo. Los valores que aparecen en la Tabla IV referentes a las dos primeras arenas, pareciera que se conforman con esta regla, puesto que el cuadrado de 4 es 16 y la relación de permeabilidades es alrededor de 18.

Sin embargo, al comparar los datos del tercer material mostrado en dicha Tabla, se observa que no sigue la regla dada por Hazen. La relación entre los cuadrados de los tamaños efectivos de las gravas gruesa y fina es de alrededor de 2, pero sus permeabilidades guardan una relación de solamente 1.4. El mayor valor del coeficiente de uniformidad de la grava fina reduce aparentemente el efecto que el mayor tamaño efectivo ejerce sobre la permeabilidad.

Las curvas de la Figura 32 corresponden a una arena fina de la formación Ripley (al sudeste de Missouri) y a una mezcla limpia de grava y arena. La Tabla V nos brinda los tamaños efectivos, los coeficientes de uniformidad y las permeabilidades de estos materiales, conjuntamente con datos similares de dos muestras adicionales que se tomaron de unos pozos de prueba perforados en el valle del North Canadian River en Oklahoma. La arena de Ripley, con un tamaño efectivo tan sólo ligeramente menor que el de la arena fina de la Tabla IV, tiene una permeabilidad de solamente alrededor de un tercio de la de la arena uniforme, debido al mayor valor del coeficiente de uniformidad de ésta.

La arena "B", que contiene un amplio rango de materiales finos a gruesos, se halla aglomerada en forma más apretada que cualquiera de las otras muestras, como lo indica su porosidad de sólo 30 por ciento.

Al comparar los datos correspondientes a las dos muestras de arena obtenidas de los pozos de prueba de Oklahoma, se puede observar que las diferencias entre los tamaños efectivos no correlacionan bien con las correspondientes a sus valores de permeabilidad.

En tanto que la comparación de los datos anteriores demuestra que, por lo general, la permeabilidad aumenta conforme lo hace el tamaño efectivo, es evidente también que otras características de la arena ejercen efectos desconocidos difíciles de evaluar mediante una sencilla fórmula que permita calcular la permeabilidad de la mayoría de

*El tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad se definen en el Capítulo 9

las arenas naturales, con base en el análisis granulométrico.

La permeabilidad estimada mediante un análisis granulométrico o medida directamente en el laboratorio por medio de un ensayo de flujo, puede utilizarse en algunos casos como guía para estimar el rendimiento de un pozo. Sin embargo, las estimaciones debe hacerlas una persona familiarizada con la tecnología de los pozos y del agua subterránea, un individuo con amplia experiencia de campo en la construcción y prueba de pozos. Las cifras que se obtengan nunca deberán usarse sin el cuidado y el juicio obtenidos de una considerable experiencia.

El coeficiente de permeabilidad tiene las dimensiones de una velocidad. Cuando este coeficiente se expresa como un pie cúbico de agua por segundo, fluyendo a través de un pie cuadrado del material del acuífero, fácilmente podemos ver que esto es lo mismo que expresar el flujo en términos de pies por día, bajo el gradiente hidráulico ya definido de 1.00. Al multiplicar este flujo por el gradiente hidráulico bajo cuyo efecto tiene lugar el desplazamiento del agua subterránea, se obtiene la velocidad del agua dentro del acuífero.

Este valor no corresponde a la velocidad real dentro de las aberturas a través de las cuales se desplaza el agua. Puede definirse como una velocidad superficial, puesto que el área que se usa al calcularla es la de la sección transversal total de la masa porosa. En cualquier sección transversal de un material poroso, están incluídas tanto la sección transversal de todas las partículas sólidas como la de las aberturas presentes entre éstas.

La velocidad dentro de los poros individuales varía de un punto a otro y resulta imposible de medir. Estos espacios porosos dentro de los materiales granulares no son tubos de diámetro uniforme sino que se asemejan a un enjambre de muchos y muchos tubos de diámetro irregular interconectados en planos caprichosos.

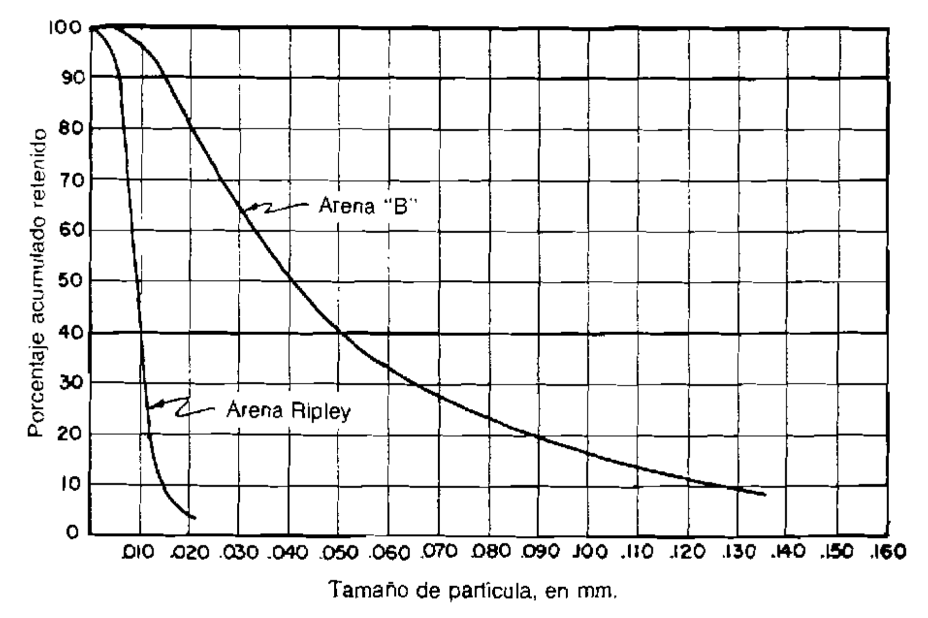


Fig. 32: Curvas granulométricas que representan la gradación de arena fina de la formación Ripley y de una formación glacial constituída por una mezcla de arena gruesa y de grava fina.

Tabla IV
Comparación de Arenas Filtrantes

	Arena Fina 0.2 a 0.3 mm	Arena Gruesa 0.84 a 1.17 mm	Grava Fina 1.17 a 2.36 mm
Tamaño efectivo en mm	0.2	0.86	1.22
Coeficientes de uniformidad	1.2	1.2	1.4
Permeabilidad en m^3/m^2/día	22	392	530
Porosidad en por ciento	37	37	35

son más uniformes que la mayoría de las gravas y arenas naturales.

La Tabla IV ofrece el tamaño efectivo, el coeficiente de uniformidad* y la permeabilidad de cada uno de los materiales a que se refieren las curvas de la Figura 31. Las permeabilidades se evaluaron mediante pruebas de flujo en el laboratorio.

Se puede observar en la Tabla IV que el tamaño efectivo de la arena gruesa es algo mayor de 4 veces el de la arena fina en tanto que su permeabilidad es alrededor de 18 veces más grande. En sus experimentos con arenas filtrantes, Allen Hazen demostró que la permeabilidad varía en proporción al cuadrado del tamaño efectivo. Los valores que aparecen en la Tabla IV referentes a las dos primeras arenas, pareciera que se conforman con esta regla, puesto que el cuadrado de 4 es 16 y la relación de permeabilidades es alrededor de 18.

Sin embargo, al comparar los datos del tercer material mostrado en dicha Tabla, se observa que no sigue la regla dada por Hazen. La relación entre los cuadrados de los tamaños efectivos de las gravas gruesa y fina es de alrededor de 2, pero sus permeabilidades guardan una relación de solamente 1.4. El mayor valor del coeficiente de uniformidad de la grava fina reduce aparentemente el efecto que el mayor tamaño efectivo ejerce sobre la permeabilidad.

Las curvas de la Figura 32 corresponden a una arena fina de la formación Ripley (al sudeste de Missouri) y a una mezcla limpia de grava y arena. La Tabla V nos brinda los tamaños efectivos, los coeficientes de uniformidad y las permeabilidades de estos materiales, conjuntamente con datos similares de dos muestras adicionales que se tomaron de unos pozos de prueba perforados en el valle del North Canadian River en Oklahoma. La arena de Ripley, con un tamaño efectivo tan sólo ligeramente menor que el de la arena fina de la Tabla IV, tiene una permeabilidad de solamente alrededor de un tercio de la de la arena uniforme, debido al mayor valor del coeficiente de uniformidad de ésta.

La arena "B", que contiene un amplio rango de materiales finos a gruesos, se halla aglomerada en forma más apretada que cualquiera de las otras muestras, como lo indica su porosidad de sólo 30 por ciento.

Al comparar los datos correspondientes a las dos muestras de arena obtenidas de los pozos de prueba de Oklahoma, se puede observar que las diferencias entre los tamaños efectivos no correlacionan bien con las correspondientes a sus valores de permeabilidad.

En tanto que la comparación de los datos anteriores demuestra que, por lo general, la permeabilidad aumenta conforme lo hace el tamaño efectivo, es evidente también que otras características de la arena ejercen efectos desconocidos difíciles de evaluar mediante una sencilla fórmula que permita calcular la permeabilidad de la mayoría de

*El tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad se definen en el Capítulo 9

las arenas naturales, con base en el análisis granulométrico.

La permeabilidad estimada mediante un análisis granulométrico o medida directamente en el laboratorio por medio de un ensayo de flujo, puede utilizarse en algunos casos como guía para estimar el rendimiento de un pozo. Sin embargo, las estimaciones debe hacerlas una persona familiarizada con la tecnología de los pozos y del agua subterránea, un individuo con amplia experiencia de campo en la construcción y prueba de pozos. Las cifras que se obtengan nunca deberán usarse sin el cuidado y el juicio obtenidos de una considerable experiencia.

El coeficiente de permeabilidad tiene las dimensiones de una velocidad. Cuando este coeficiente se expresa como un pie cúbico de agua por segundo, fluyendo a través de un pie cuadrado del material del acuífero, fácilmente podemos ver que esto es lo mismo que expresar el flujo en términos de pies por día, bajo el gradiente hidráulico ya definido de 1.00. Al multiplicar este flujo por el gradiente hidráulico bajo cuyo efecto tiene lugar el desplazamiento del agua subterránea, se obtiene la velocidad del agua dentro del acuífero.

Este valor no corresponde a la velocidad real dentro de las aberturas a través de las cuales se desplaza el agua. Puede definirse como una velocidad superficial, puesto que el área que se usa al calcularla es la de la sección transversal total de la masa porosa. En cualquier sección transversal de un material poroso, están incluidas tanto la sección transversal de todas las partículas sólidas como la de las aberturas presentes entre éstas.

La velocidad dentro de los poros individuales varía de un punto a otro y resulta imposible de medir. Estos espacios porosos dentro de los materiales granulares no son tubos de diámetro uniforme sino que se asemejan a un enjambre de muchos y muchos tubos de diámetro irregular interconectados en planos caprichosos.

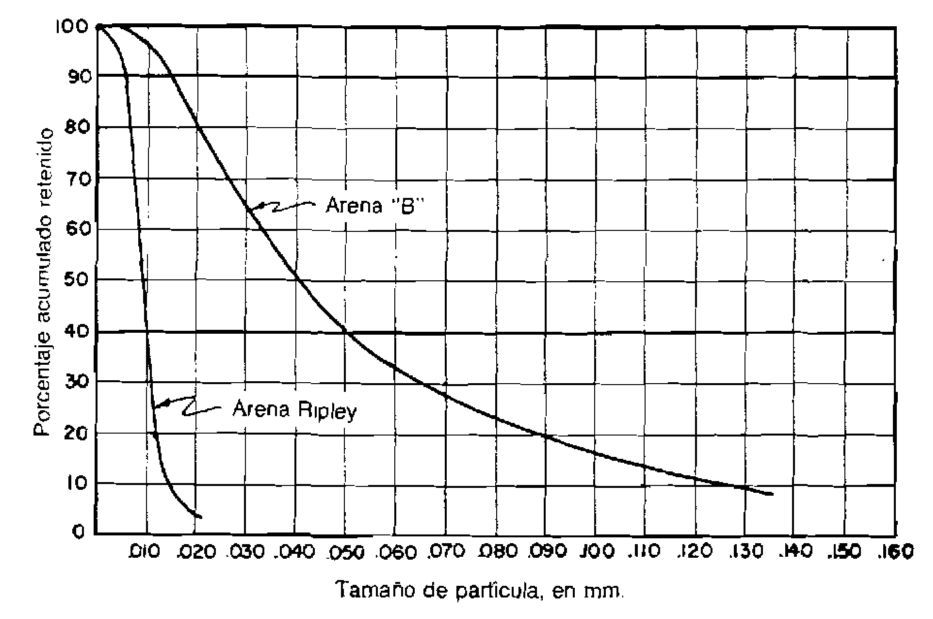


Fig. 32: Curvas granulométricas que representan la gradación de arena fina de la formación Ripley y de una formación glacial constituida por una mezcla de arena gruesa y de grava fina.

Tabla V
Comparación de Arenas Naturales

	Arena de Ripley	Arena "B"	Valle del Río North Canadian	
			Muestra 34-4	Muestra 44-6
Tamaño efectivo, mm	0.15	0.38	0.13	0.20
Coeficiente de uniformidad	1.7	3.4	2.0	1.6
Permeabilidad, en m³/m²/día	6.52	53.0	4.08	21.1
Porosidad en por ciento	35	30	31	31

Algunas veces, para poder medir la velocidad del agua subterránea, se introduce un colorante o una sal en un pozo y se mide su tiempo de llegada a otro pozo situado a cierta distancia aguas abajo del primero. En la mayoría de los casos los resultados son inexactos. En muchos otros, la dispersión del trazador y otros factores, introducen errores.

Al efectuar tales pruebas, ambos pozos deben estar alineados en una trayectoria paralela al flujo subterráneo. El gradiente hidráulico debe determinarse con precisión. Debe además conocerse la porosidad del acuífero.

El valor de la velocidad establecido por este método generalizado, tiende a ser el máximo entre ambos pozos. Parte de la solución trazadora se desplaza a su mayor velocidad dentro de los estratos más permeables. Esta parte de la sustancia trazadora aparece de primera en el pozo situado aguas abajo.

Los trazadores, incluyendo los materiales radioactivos, resultan más prácticos para poner en evidencia el régimen de flujo subterráneo que para medir el valor de la velocidad. Para ayudar en los estudios del movimiento de los contaminantes que penetran dentro de los acuíferos, se utiliza también muy a menudo el método de los trazadores.

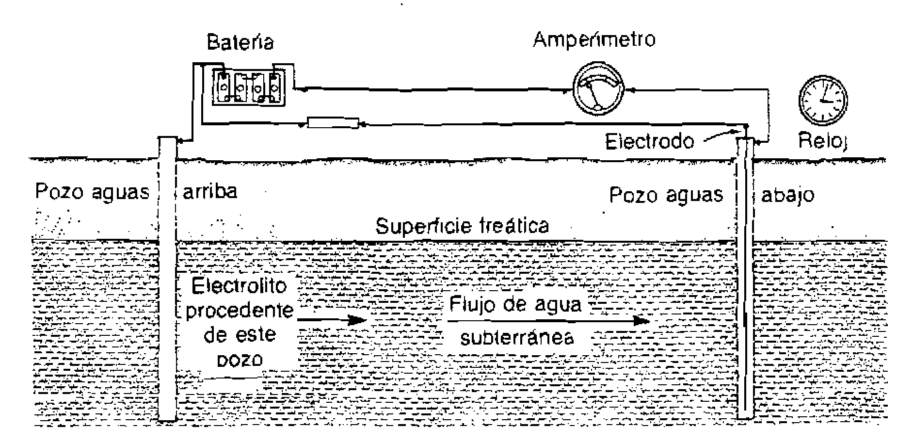


Fig. 33: Esquema de la determinación de la velocidad del flujo subterránea mediante el uso de una sal como trazador. El aumento de la conductividad eléctrica en el pozo situado aguas abajo, indica la llegada del trazador.

Referencias

1. MEINZER, O. E., *"Occurrence of Ground Water in the United States,"* Water Supply Paper 489 (1923), U. S. Geological Survey, Washington, D. C.
2. LEOPOLD, L. B. AND LANGBEIN, W. B., *"A Primer on Water"* (1960), U.S. Geological Survey, 50 p. Washington, D. C.
3. THOMAS, H. E., *"Underground Sources of Our Water,"* Water, U. S. Dept. of Agriculture Yearbook (1955), pp. 62-77, Washington, D. C.
4. TOLMAN, C. F., *"Ground Water"* (1937), 593 p. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
5. THOMAS, H. E., *"Ground-Water Regions of the United States — Their Storage Facilities"* Interior and Insular Affairs Committee Report (1952) U. S. Congress, pp 3-13, Washington, D. C.
6. ACKERMANN, W. C., COLMAN, E. A., OGROSKY, H. O., *"From Ocean to Sky to Land to Ocean"* Water, U. S. Dept. of Agriculture Yearbook (1955), pp. 41-51
7. MEINZER, O. E. (Editor), *"Hydrology"* (1942), 712 p. McGraw-Hill, New York
8. PREE, H. L., JR., WALKER, W. H. AND MACCARY, L. M., *"Geology and Ground-Water Resources of the Paducah Area, Kentucky,"* Water-Supply Paper 1417 (1957), U. S. Geological Survey, Washington, D. C.
9. WELLS, F. G., *"Ground-Water Resources of Western Tennessee,"* Water-Supply Paper 656 (1933), U. S. Geological Survey, Washington, D. C.
10. ROBERTS, J. K. AND GILDERSLEEVE, BENJAMIN, *"Geology and Mineral Resources of the Jackson Purchase Region, Kentucky"* Series 9, Bulletin 4 (1950), Kentucky Geological Survey
11. KULP, J. L., *"Geologic Time Scale"* Science, Vol. 133, No. 3459 (1961), p. 1111, AAAS, Washington, D. C.
12. SAYRE, A. N., SMITH, W. O., *"Retention of Water in Silts and Sands,"* Prof. Paper 450-C (1962), U. S. Geological Survey, Washington, D. C.
13. HAZEN, ALLEN, *"Some Physical Properties of Sands and Gravels,"* Mass. State Board of Health, 24th Annual Report (1893).
14. MOGG, JOE L., *"Permeability as a Function of the Median Diameter and Sorting Coefficient of Unconsolidated Materials in the North Canadian River Valley,"* Master's thesis (1955), University of Oklahoma.

Capitulo 3

Regiones Acuiferas

PARA PODER describir la situación del agua subterránea en una área o en un país, se hace necesario elaborar mapas y clasificar sus acuíferos productores, que son los depósitos de agua subterránea. Mediante los estudios de sus características geológicas e hidrogeológicas y de la magnitud de las extracciones de agua que se estén efectuando en varios lugares, se llega a conocer su disponibilidad y las limitaciones críticas en aquellas áreas que ofrecen problemas.

Casi todo país ha sido favorecido con valiosos recursos de agua subterránea. El agua subterránea es un recurso universal y sus manifestaciones no tienen relación con fronteras territoriales o políticas. En algunos países se han realizado inventarios de los recursos de agua subterránea. Sería de enorme interés describir cada uno de ellos, pero el espacio de este libro no nos lo permite

Tanto el agua subterránea como el agua superficial de cualquier país no constituyen recursos separados, sino que por el contrario, son parte del recurso hidráulico común. En lo referente al agua subterránea, lo importante es lo que a las formaciones acuíferas corresponde dentro de esta parte del recurso total.

McGuinness[3] lo ha descrito de la siguiente manera: "Las formaciones captan el agua, la filtran para eliminar el sedimento y la bacteria patógena, la almacenan en cantidades que ampliamente superan las que podrían ser retenidas en todos los embalses naturales y artificiales juntos, mantienen inmutable su temperatura y su calidad química, la transportan desde áreas de recarga hasta los sitios en que se utiliza, y regulan su descarga natural hacia la superficie para producir el flujo de estiaje de los ríos."

Aunque el territorio de los Estados Unidos es extenso, y las condiciones hidrológicas difieran mucho de una parte a otra del país, se han delimitado 10 regiones que sirven para catalogar la disponibilidad de agua subterránea.

El difunto Dr. O. E. Meinzer[1] ha dividido los 48 estados continentales del país en 21 provincias referentes al agua subterránea, habiéndolas descrito en 1923, en una publicación del Servicio Geológico del los Estados Unidos. Unos 30 años después, H. E. Thomas[2] consolidó y reacomodó las 21 provincias de Meinzer en 10 regiones de agua subterránea. Estas regiones establecidas por Thomas han sido ampliamente reeonocidas como la mejor clasificación global del la situación del agua subterránea en los Estados Unidos, considerando separadamente a Alaska y Hawaii.

Este capítulo ofrece una breve descripción de cada una de estas 10 regiones además de unos cuantos comentarios de los recursos de agua subterránea existentes an Alaska y en Hawaii.

Los tipos de acuíferos constituyen el fundamento de la división en 10 principales regiones acuíferas. Sus límites se trazaron sin considerar el factor de la edad geológica de los acuíferos y sin tratar de relacionar estas regiones con cuencas hidrográficas. La mayor parte de los principales ríos drenan una o más de las regiones, las cuales contienen diferentes tipos de depósitos subterráneos, a veces en contraste.

Cadenas Montañosas Occidentales

La región de las Cadenas Montañosas Occidentales abarca las Montañas Rocosas, la Cadena Cascada, y la Sierra Nevada, las Cadenas Costeras del Norte y otras cadenas aisladas de esta área general. Estas montañas están formadas principalmente de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias duras, formaciones que por lo general no son aptas para las manifestaciones del agua subterránea. Al comparárselas con la mayor parte de las otras regiones acuíferas, los acuíferos de la Cadena Montañosa Occidental resultan ser de extensión limitada, volumen reducido y rendimientos pequeños. En las rocas sólidas los acuíferos están presentes donde tienen lugar las aberturas del tipo de fracturación; esto permite únicamente pequeños rendimientos suficientes quizás para abastecer pozos de uso doméstico. Se pueden encontrar mejores acuíferos en los depósitos aluvionales de los pequeños y aislados valles.

Las Cadenas Montañosas Occidentales sirven principalmente como áreas de captación de la precipitación y como cuencas. Esta es una región en la cual las rocas encauzan y derraman agua en lugar de absorberla. La escorrentía de las pendientes montañosas alimenta los acuíferos de las regiones aledañas. La precipitación anual es alta y como la población se halla dispersa, el suministro de agua en la región supera a las necesidades

Cuencas Aluvionales

La región de las *Cuencas Aluvionales* consiste de valles y cuencas que se encuentran rodeadas por las cadenas montañosas. Estas cuencas se hallan rellenas de materiales no consolidados tales como el limo, la arcilla, arena, grava y cantos rodados producto de la erosión de las laderas montañosas.

Aunque es típicamente árida, la región incluye una área separada y más húmeda, la depresión comprendida entre las cadenas costeras y la cadena de las Cascadas. Esta área incluye las tierras bajas de Puget Sound, en Washington y el Valle de Willamette en Oregón. La región contiene algunas montañas que por lo general están más aisladas y son de menor elevación, que las de la Cadena Montañosa propiamente dicha.

La precipitación varía desde menos de 760 mm. hasta más de 1,500 mm. al año, recibiendo la mayor parte de la región algo menos de 380 mm. al año. Desafortunadamente, la precipitación se halla mal distribuida en la mayoría de la región y por lo general es inadecuada durante la época de crecimiento de las plantas.

Esta región lleva la delantera a todas las otras en la magnitud del uso que hace del agua subterránea, especialmente para riego. Más de la mitad de toda el agua subterránea que se obtiene en el país, se extrae por bombeo de los acuíferos de esta región particular. Lo anterior es posible debido a las vastas cantidades de agua almacenada en

1 Cadenas montañosas Occidentales
2 Cuencas aluviales
3 Meseta lávica de Columbia
4 Meseta de Colorado
5 Altiplanicies
6 Región Central de origen glacial
7 Región Central sin glaciación
8 Apalaches no glaciales
9 Apalaches glaciales
10 Planicie costera

Fig. 34: Las diez mayores regiones acuíferas de los Estados Unidos, exceptuando Alaska y Hawaii. (Después de Thomas y McGuinness).

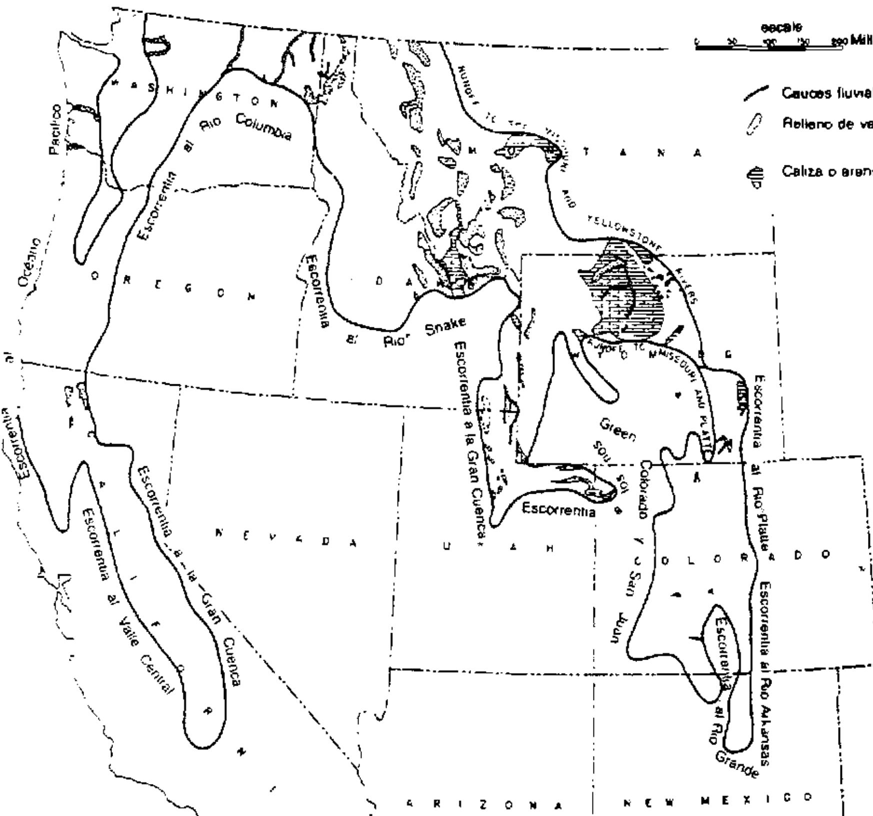


Fig. 35: Las Cadenas Montañosas Occidentales constituyen áreas colectoras de nieve y agua.

el subsuelo. El relleno de los valles en algunos lugares es de varios cientos de metros y en otros su espesor alcanza hasta varios miles.

El almacenamiento de agua subterránea es tan grande que en las primeras etapas de desarrollo se creyó que el recurso era ilimitado e inagotable. Sin embargo, aquellos pozos que se han estado bombeando por casi 50 años en algunas cuencas, indican que el almacenamiento se ha venido reduciendo. Todavía existen en almacenamiento subterráneo en ciertos valles, grandes volúmenes de agua, pero la recarga anual que éstos experimentan es reducida. Esta recarga consiste principalmente de la percolación proveniente de ríos que se originan en las cadenas montañosas circundantes.

La acción disturbadora del agua que fluye desde las montañas hacia las cuencas ha convertido el residuo de la erosión en grava, arena, limo y arcilla. El grueso del relleno aluvial consiste de limo y arcilla, el cual tiende a ser más abundante en la parte central de cada cuenca. El relleno en cada valle de hecho consiste de sedimentos aluviales agregados depositados por todos los cañones que drenan hacia éste.

Cerca de la desembocadura de cada cañón y en el fondo del relleno aluvial se encuentran por lo general arena y grava. Sin embargo, se pueden observar ocasionales venas y lechos de arena y grava intercalados

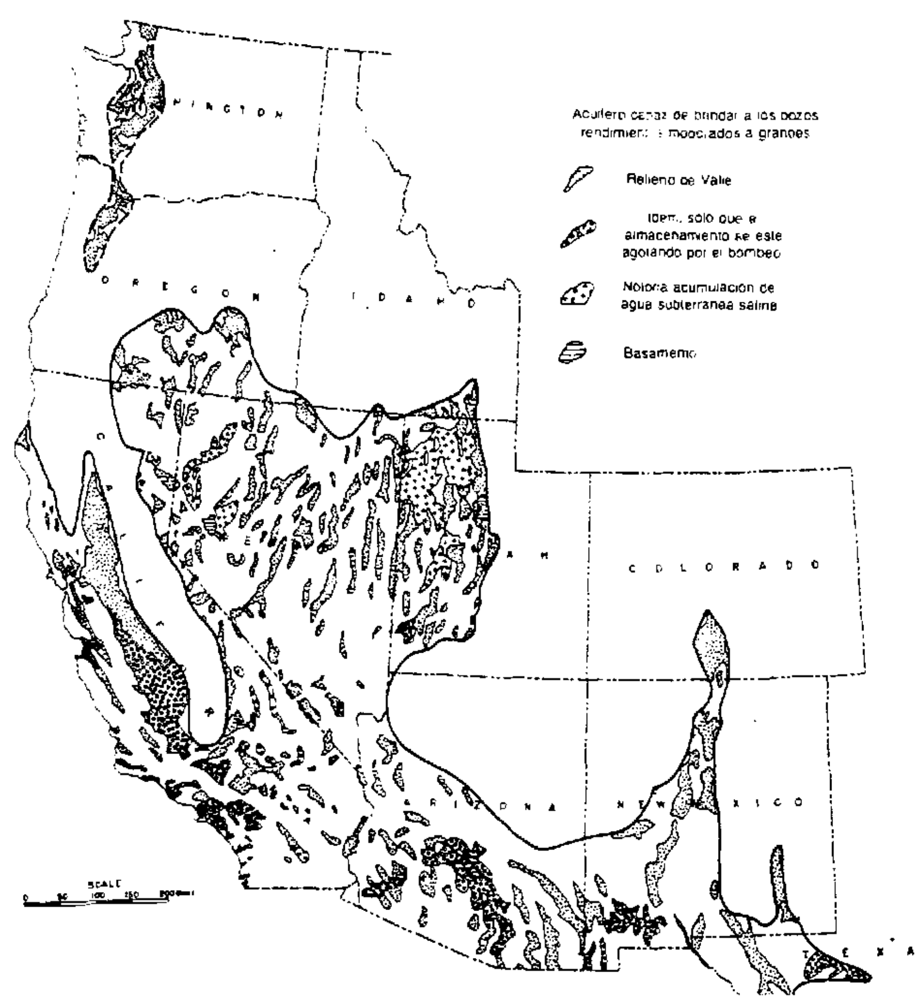


Fig. 36: Las Cuencas Aluviales reciben la escorrentía proveniente de las montañas y almacenan grandes cantidades de agua subterránea.

entre las capas de limo y arcilla a lo largo de todo el espesor. La porción superior del relleno del valle consiste por lo general de material finamente gradado. La estratificación es por lo común tan compleja, que solamente mediante un cuidadoso estudio se podría predecir la presencia del agua subterránea. Así pues, resulta conveniente perforar pozos de prueba antes de construir grandes pozos.

Dentro de esta región quedan ubicados los principales lugares residenciales, agrícolas e industriales del Suroeste. Existe además una enorme demanda de agua, siendo la potencial aún mayor, ya que la población crece rápidamente y queda todavía mucho terreno fértil que regar. La disponibilidad de agua superficial es adecuada y, en algunos casos, más que suficiente

En algunas cuencas occidentales se está

haciendo uso del agua subterránea en cantidad mayor que la recarga que se recibe, lo que está minando el almacenamiento anterior. En ciertos sitios, la extracción de agua subterránea ha provocado la intrusión salina desde el mar y también desde aquellas partes bajas salinizadas, de cuencas situadas tierra adentro. El uso repetido ha deteriorado la calidad química tanto del agua de la superficie como de la subterránea. El efluente natural que anteriormente descargaba los excesos de sales, se ha reducido, lo que ha dado origen a la acumulación de éstas. Otras áreas, de drenaje inadecuado, han llegado a sobresaturarse por exceso de riego.

Si no se toman medidas que remedien la situación, el desarrollo de esta región se verá restringido por los diversos y complejos problemas de agua que surgirán.

La Meseta Lávica de Columbia

La región de *La Meseta Lávica de Columbia* se halla principalmente subyacida por lava de tipo basáltico, pero también incluye unas cuantas cuencas rellenas con material aluvional. El clima va desde árido a

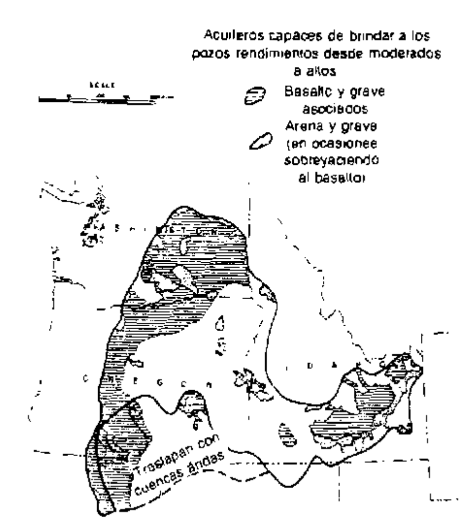


Fig. 37: La Meseta Lávica de Columbia, cuyas rocas consisten principalmente de lava basáltica.

húmedo y la precipitación media anual fluctúa desde algo menos de 250 mm. hasta más de 760 mm.

Una vasta erupción de lavas constituye el hecho principal de la historia geológica de la Meseta de Columbia; en consecuencia, las erupciones volcánicas son las que han producido las rocas que se observan en esta región, como también son el resultado de las mismas los depósitos sedimentarios derivados de los materiales volcánicos, los diques, sillares y otras rocas intrusivas que guardan relación con la actividad volcánica. En algunos lugares, cerca de los límites de la región, el espesor de los materiales volcánicos es de menos de 30 metros. Pero por lo común, los espesores son de centenares y hasta miles de mts.; un pozo petrolero de prueba se sabe que penetró hasta 3,000 metros de profundidad dentro de la lava basáltica, sin haber alcanzado el límite inferior del depósito. Estos grandes espesores se formaron por la deposición sucesiva de varias coladas de lava, una tras otra.

Las rocas varían mucho en lo referente a sus propiedades acuíferas. En la parte occidental del área, las zonas de contacto entre las sucesivas coladas de lava son las más permeables, pero alejándose hacia el oeste, en Idaho, los espacios porosos consisten principalmente de aberturas debidas a fracturación. En algunos sitios la lava solidificada se encuentra tan fracturada que parece prácticamente un cascote. La porosidad y la capacidad de almacenar agua se ven aumentadas por las burbujas de aire, conductos tabulares dentro de la lava y pequeñas cavernas. Entre las capas de lava basáltica se presentan también estratificaciones permeables de grava y arena.

En la vecindad de Spokane, Washington, se observan notables depósitos de residuos glaciales. Estos sedimentos son extremadamente permeables y en pozos de 40 cm. de diámetro perforados en ellos, se

han determinado capacidades específicas de hasta 200 litros por segundo por cada metro de abatimiento

Utilizando las aguas superficiales de los ríos Snake y Columbia, que atraviesan la región, se han desarrollado grandes aprovechamientos de agua de superficie. Algunas áreas sometidas a riego con agua de superficie, se hallan sobresaturadas, lo que actualmente está dando lugar a serios problemas de drenaje. A su vez, está tomando incremento el uso de agua subterranea para fines de riego e industriales.

La región todavía dispone de un gran potencial para el desarrollo del recurso hidráulico. Como existe un problema de tipo competitivo entre el uso del agua para riego y para generación hidroelétrica, se hace necesario realizar considerable cantidad de estudios para establecer las relaciones entre las corrientes superficiales y los acuíferos.

La Meseta de Colorado

La región de *La Meseta de Colorado* consiste principalmente de mesetas disecadas, altas y secas bajo las cuales yacen rocas sedimentarias, tendidas horizontalmente o de buzamiento moderado, fracturadas en forma de grandes bloques por fallamientos geológicos. Las rocas están constituídas principalmente por lutitas y areniscas. La región se encuentra al oeste de las Montañas Rocosas pero incluye también una área de Wyoming que estructuralmente es una cuenca rodeada de montañas, pero similar a las mesetas en los otros aspectos.

Puesto que la población se halla dispersa en la región, las necesidades de agua son pequeñas. La escasez de acuíferos productores limita el posible desarrollo. La mayoría de los acuíferos están constituídos por lechos de arenisca, aunque en algunos lugares el agua subterránea se manifiesta en la caliza y en el aluvión. Generalmente, los pozos sólo producen unos pocos litros o decenas de éstos por segundo.

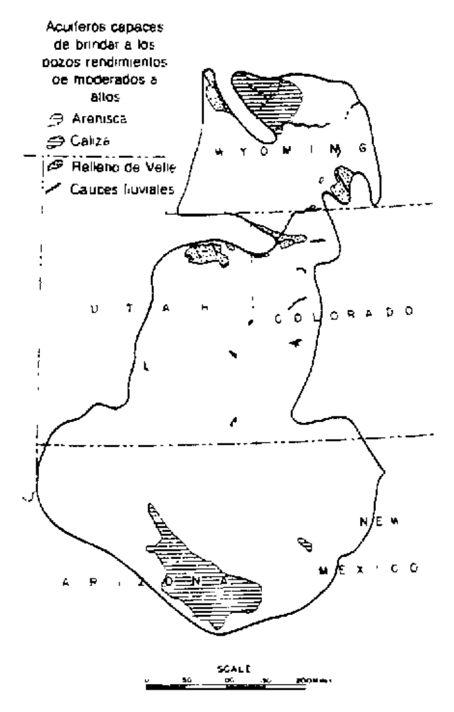


Fig. 38: En la región de la Meseta de Colorado escasea el agua para una población tan dispersa.

Unicamente se pueden desarrollar buenos pozos mediante un cuidadoso estudio de los diversos estratos rocosos que permita conocer las formaciones saturadas que se encuentran dentro de profundidades asequibles y que contengan agua de calidad aceptable.

Las Altiplanicies

La region acuífera de *las Altiplanicies* abarca las extensas planicies y mesetas semiáridas y subhúmedas situadas al este de las Montañas Rocosas y que se extienden desde Dakota del Sur hasta el occidente de Texas y al este de Nuevo México. Esta región es el remanente de un extenso delantal de material aluvional que fue depositado al este de las montañas hace varios millones de años.

El terreno fue levantado después que los

materiales fueron depositados originalmente. Una vez acaecido lo anterior, los ríos erosionaron y cortaron el delantal aluvional alrededor de sus bordes, tanto a lo largo de su margen occidental cercano a la base de las montañas, como también en el contorno de sus límites orientales. Lo que ahora queda de la formación original se halla aislado de aquellas montañas que fueron la fuente de donde salieron la arena y la grava empleadas en su construcción. Los ríos que en un principio fluyeron desde las montañas y hacia el este, mantuvieron saturado el aluvión. Actualmente, los acuíferos son recargados principalmente por la lluvia y la nieve que caen dentro de la misma región.

El grueso de los depósitos aluvionales de esta vasta planicie se conoce como la Formación Ogallala. Esta cubre los antiguos basamentos rocosos con espesores que en algunos lugares alcanzan hasta 125 mts. Como la formaeión abarca un gigantesco abanico aluvial de residuos rocosos erosionados en las montañas, la Formación Ogallala ostenta las características de estos tipos de depósitos. El tamaño de las partículas de los materiales que constituyen la Formación Ogallala, varía ampliamente desde muy fino hasta grueso. En el término de cortas distancias, tanto vertical como horizontalmente, se manifiestan variaciones abruptas que van desde el limo y la arcilla, hasta arenas y gravas gruesas. Antes de escoger los sitios para la ubicaeión de pozos en esta región, es necesario perforar agujeros de prueba.

Cierto número de corrientes de la región fluyen desde el oeste hacia el este. Los lechos fluviales y los depósitos formados por terrazas constituyen acuíferos locales importantes asociados a estas corrientes.

Los acuíferos de la región brindan cantidades de agua a los pozos, las cuales van desde moderadas a altas. La recarga varía grandemente, pero por lo genéral la menor tiene lugar en la parte sur y la mayor en el norte.

En Nebraska existe un depósito muy extenso de arena de origen eólico que cubre la parte superior de la Formación Ogallala comprendida entre los ríos Platte y Niobrara. Este depósito constituye los bien conocidos lomeríos arenosos del área de Nebraska. La precipitación es fácilmente absorbida y se calcula que la recarga en la región es del orden de unos 130 mm. de lámina líquida por año. En las Planicies Elevadas de Texas la recarga varía en forma decreciente desde a lo sumo 25 mm. hasta algo menos de una fracción de esto por año.

La productividad de los pozos en las Planicies Elevadas ha propiciado el uso del agua para propósitos múltiples, con énfasis en riego. En la región noroccidental de Texas se encuentran en uso unos 50.000 pozos para riego. La cantidad de agua que se extrae de estos pozos en el área mencionada, excede de la recarga en unas 10 veces por año.



Fig. 39: Los acuíferos de la región de Las Altiplanicies consisten principalmente de arenas y gravas.

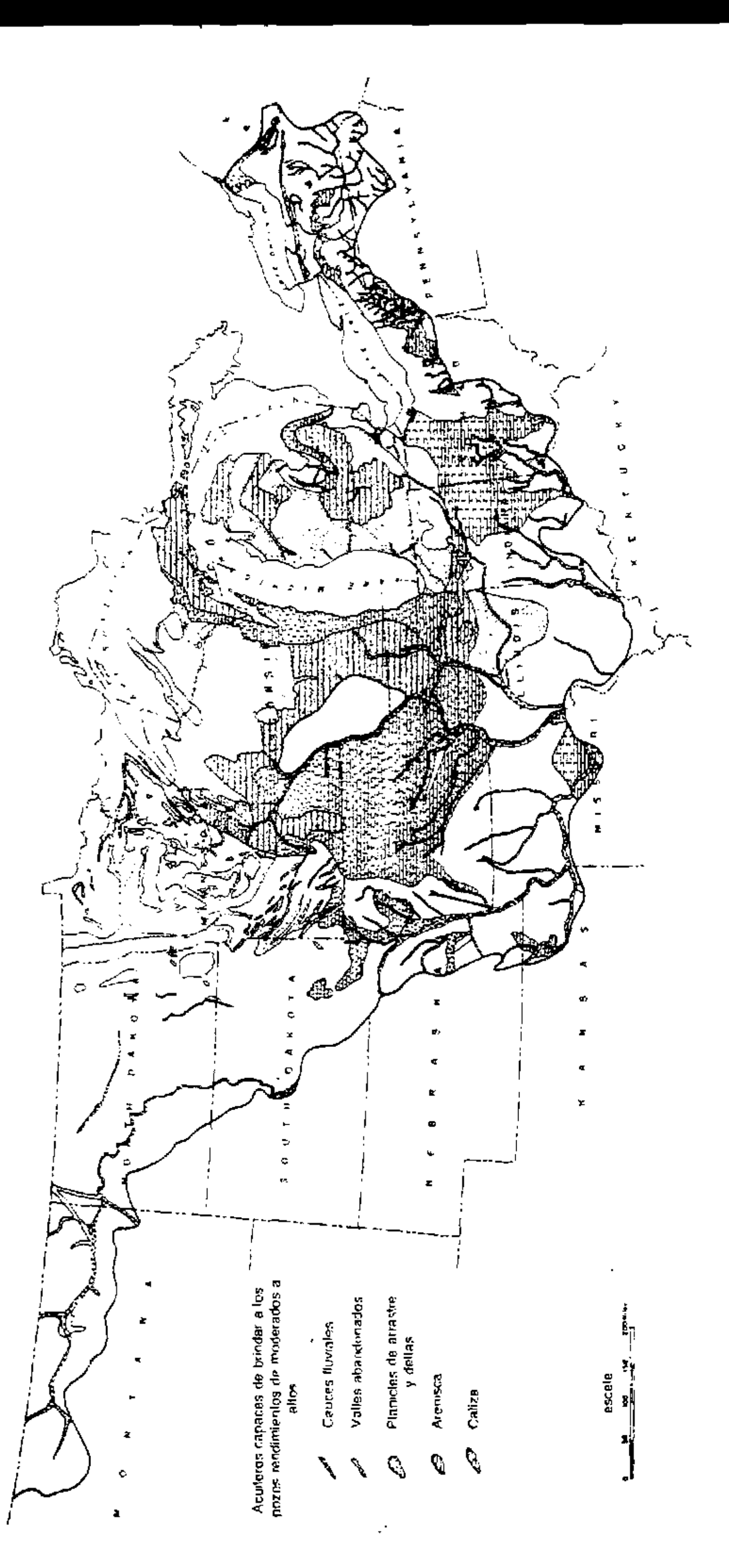


Fig. 40: La Tierras Bajas Glaciales del Centro incluyen todas las áreas visitadas por los glaciares, excepto aquellas de los Estados nororientales. Los acuíferos están constituídos por depósitos de arena y grava de origen glacial, extensas areniscas e importantes formaciones calizas.

Más al norte, en Nebraska, unos 25.000 pozos para riego han entrado en uso en los últimos 20 años.

En aquellas áreas en donde la extracción de agua, debido a un intenso bombeo, excede de la recarga natural, el almacenamiento original está siendo minado y reducido Conforme pase el tiempo, se hará necesario restringir el uso del agua subterránea. El problema inmediato, pues, es el de encontrar la mejor manera de establecer un uso racional de un recurso que se agota.

Eventualmente, las grandes extracciones de agua subterránea mediante pozos, llegarán a afectar los flujos de estiaje de los ríos, y la reducción de los recursos impedirá utilizar el agua a los caudales actuales.

Las Tierras Bajas Centrales de Origen Glacial

La región de las *Tierras Bajas Centrales de Origen Glacial*, abarca aquella parte del territorio central de los Estados Unidos que en un tiempo estuvo cubierta por los glaciares continentales que se desplazaron hacia el sur procedentes del Canadá. Esta región se extiende desde las Montañas Rocosas por el oesta hasta los Apalaches en el este y desde la frontera con el Canadá hacia el sur llegando hasta los límites de la glaciación. Los cursos actuales del río Missouri desde Great Falls, en Montana, hasta St. Louis, en Missouri y del río Ohio desde Pittsburgh, en Pennsylvania hasta su desembocadura en Cairo, Illinois, se hallan por lo general muy cerca del límite sur de las áreas de glaciación.

En la mayor parte de la región, la superficie del terreno estaba formado antes de la glaciación por rocas sedimentarias consolidadas, tales como calizas y areniscas, excepto ciertas partes de Minnesota y del norte de Wisconsin y Michigan, en las cuales la superficie anterior a la glaciación estuvo constituída por rocas cristalinas y metamórficas.

Las rocas consolidadas que se hallan por debajo de los residuos glaciales, consituyen depósitos importantes de agua subterránea que se asemejan a los acuíferos de la región no glacial del sur. Uno de los mejores acuíferos con que se cuenta en el país es la arenisca de Dakota presente en el occidente de la región.

El manto de residuos glaciales contiene muchos acuíferos productores formados por grava y arena. Asimismo, éste actúa como un medio que absorbe el agua proveniente de la precipitación y la deja infiltrar hasta la roca que yace por debajo.

El depósito de residuos glaciales tiene su mayor espesor en la parte sur de Michigan, y cerca de Cadillac alcanza un total de unos 300 mts. En aquellos lugares en donde el aluvión está formado en su mayor parte por el producto del arrastre del glaciar, se encuentran acuíferos fluviales de grava y arena a lo largo de extensos tramos de los ríos Ohio, Missouri y Mississippi y en sus principales afluentes.

Los depósitos de origen glacial son de mayor producción en la parte media de la región. En ciertas áreas en donde el residuo glacial no resulta de gran productividad, el basamento rocoso suministra buenos rendimientos a los pozos. Existen acuíferos de arenisca que se extienden a lo largo de extensas partes de Iowa, Minnesota oriental, Wisconsin, norte de Illinois y Michigan.

Los problemas relativos al agua vistos en forma global, no son tan serios como en otros lugares, pero en algunas comunidades industriales se ha presentado a veces alguna escasez de agua. Los depósitos de origen glacial en la parte noroccidental del área consisten de arenas de fina gradación y de baja permeabilidad. En tales condiciones resulta difícil obtener rendimientos acuíferos de moderada o alta magnitud.

La Región Central no Glacial

La *Región Central no Glacial* es una vasta área interior ubicada al sur del área de glaciación descrita anteriormente, y al norte

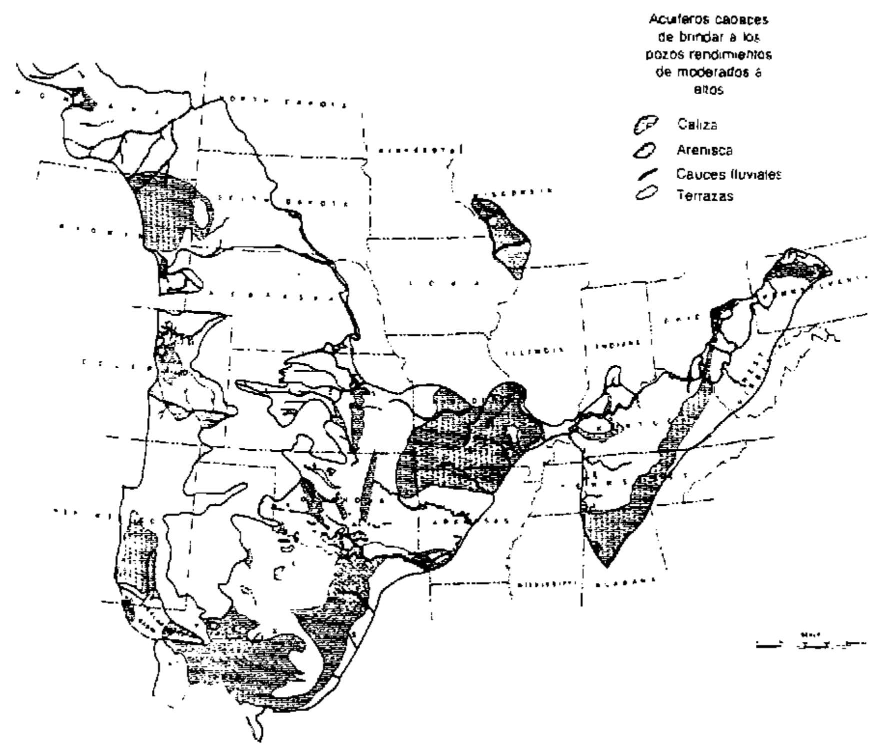


Fig. 41: La Región Central no Glacial, se halla al sur del área de glaciación, exceptuando la región de las Altiplanicies. La mayor parte de los acuíferos productivos consisten de calizas y de arenas y gravas que yacen a lo largo de algunas corrientes.

de las Planicies Costeras del Golfo. Consiste de las planicies interiores y mesetas bajas situadas al sur del límite de la glaciación y se extiende desde las Montañas Rocosas por el oeste, hasta los Apalaches por el este, pero excluyendo la región acuífera de las Planicies Elevadas. Comprende además una área aislada en Wisconsin, Minnesota y Iowa, que es parte del área que se conoce como libre de residuos de acarreo. Por el sudoeste la región se traslapa con las Cuencas Aluviales.

Esta región se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias consolidadas horizontales o de suave buzamiento. Unicamente en los valles de los mayores ríos, éstas se hallan cubiertas por sedimientos no consolidados. Los acuíferos de la mayor parte de la región consisten de caliza y arenisca de producción moderada. A lo largo de los ríos más grandes se encuentran depósitos de ancho y espesor apreciables, cuyas permeabilidades van desde moderadas hasta altas.

Thomas[2] describe en la forma siguiente algunas otras características de la región:

"En la región, la precipitación y la escorrentía aumentan desde el oeste hacia el este. Tanto la recarga como la descarga de agua subterránea, no son grandes en términos generales, y la escorrentía de los ríos es pequeña en verano y en otoño.

"Los problemas hídricos de la región consisten en que el suministro de agua es inadecuado como para obtener un costo razonable en sus diversos usos,

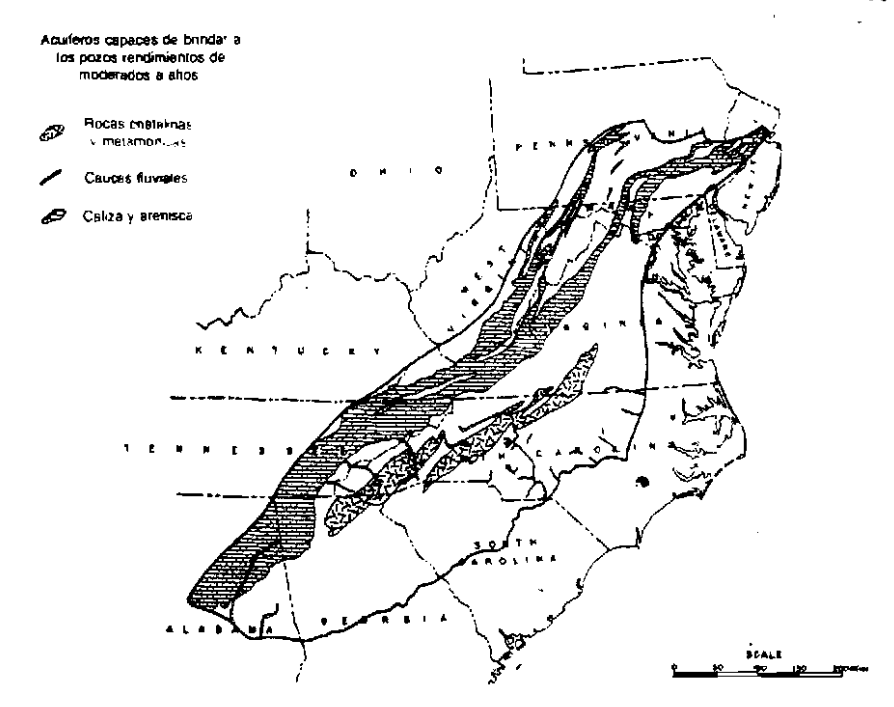


Fig. 42: La Región de los Apalaches no glaciales, montañas y terrenos ondulados elevados, separados por anchos valles.

acentuándose esta situación hacia las partes occidentales más secas. No se dispone de agua subterránea de buena calidad en aquellas profundidades mayores que se hallen por debajo del lecho de los ríos, excepto en ciertos sitios en donde la arenisca y ciertas rocas asociadas se hallan sepultadas profundamente. Aunque el almacenamiento del agua superficial resulta esencial para su uso en gran escala en muchas partes de la región, no abundan los sitios apropiados para ubicar embalses.

"La experiencia ha demostrado que las posibilidades de éxito en el desarrollo de los recursos de agua subterránea se ven aumentadas si se realiza un estudio cuidadoso de la hidrología local y regional. En algunas áreas no favorecidas, los estudios como el indicado han logrado mejorar la proporción de pozos que han tenido buen resultado, desde 1 en 5 hasta 4 en 5. Con base en lo anterior, pareciera que es posible obtener mayor desarrollo de los recursos subterráneos. Pareciera también que es posible lograr muchos más desarrollos de pequeños almacenamientos de agua de superficie. Y se cree factible el inducir infiltración a lo largo de los principales ríos para desarrollos de agua subterránea en gran escala."

Los Apalaches no Glaciales

La región de los *Apalaches no Glaciales*,* se caracteriza por montañas y terrenos elevados ondulados separados por anchos valles. Incluye las cordilleras y valles de los Apalaches desde Pennsylvania y New Jersey por el norte hasta Alabama y Georgia por el sur. Es una área de terreno elevado comprendida entre las tierras bajas centrales por el oeste y las planicies costeras del este. Esta región incluye cuatro segmentos bien

diferenciados, a saber: el Piedemonte, La Cordillera Azul, La Cordillera y Valle y las Mesetas de los Apalaches.

El Piedemonte representa una gran masa de rocas que ha sido extensamente meteorizada y erosionada hasta llegar a formar una meseta bajo la cual se halla situada ligeramente por encima de la Planicie Costera. La Cordillera Azul tiene una constitución parecida, pero se halla a mayor elevación, debido en parte a que ha sido levantada a lo largo de fallas y en parte también a que algunas de sus rocas son más resistentes a la erosión que aquéllas del Piedemonte. El área de Valle y Cordillera se caracteriza por contener rocas plegadas, especialmente calizas. Dentro del área existen algunos grandes manantiales y pozos productores, pero no es fácil encontrar sitios en donde construir pozos de alta producción.

En las Mesetas de los Apalaches subyacen calizas, areniscas y lutitas. Tanto la caliza como la arenisca son de regular rendimiento. Las mesetas se hallan elevadas y dentro de ellas se han formado grandes cañones. En la mayoría de los lugares, el perforar para localizar un acuífero confiable, resulta difícil y costoso.

La región es húmeda y abarca áreas correspondientes a las más altas precipitaciones anuales del este de los Estados Unidos. La escorrentía es elevada y el caudal de los ríos es persistente como resultado de una precipitación uniformemente distribuída a través del año.

Para lograr mayor eficiencia en los desarrollos moderados de agua subterránea, se hace necesario realizar estudios sistemáticos. Con el objeto de obtener rendimientos más seguros de los pozos, conviene aplicar métodos científicos cuando se trate de localizar aquéllos en ciertas áreas de calizas y rocas fisuradas. Con excepción de las áreas de calizas, las rocas consolidadas de esta región resultan ser lugares inadecuados para la perforación de pozos de los que se pretenda obtener grandes

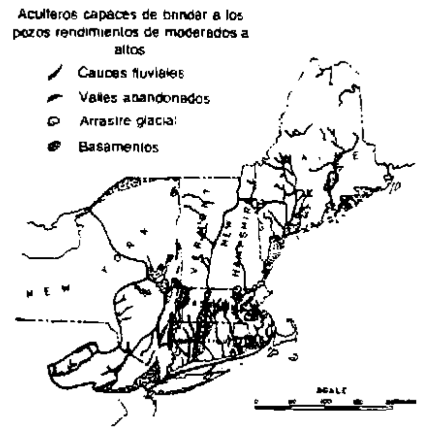


Fig. 43: La región de los Apalaches Glaciales, ondulada y montañosa, contiene acuíferos glaciales de grava y arena, y algunos otros constituídos por calizas.

rendimientos. El lugar más prometedor para la obtención de grandes cantidades de agua, lo constituyen los lechos de arena y grava que se encuentran en las planicies de inundación de aquellos ríos de régimen perenne.

Los Apalaches Glaciales

La región de los *Apalaches Glaciales* incluye toda la Nueva Inglaterra, el este de New York y el norte de New Jersey. Los basamentos rocosos del área son similares a los de la región no glacial situada al sur. Los basamentos rocosos acuíferos más productivos los forman las areniscas de una parte del norte de New Jersey y las rocas carbonáticas de otras áreas esporádicas. Sin embargo, algo menos del 10 por ciento del área se haya subyacida por buenos acuíferos rocosos. La región se caracteriza por sus terrenos ondulados o montañosos. Las alturas se hallan cubiertas por un manto de acarreo glacial; pero en las pendientes y en los afloramientos rocosos, se observa menos material de glaciación. En los valles se encuentran mayores espesores de residuos glaciales.

Los mejoras acuíferos están constituídos

por arenas y gravas de origen glacial que se presentan en la forma de planicies de arrastre y rellenos de valles. Los primeros de estos depósitos son algunas veces de un espesor de solamente unas cuantas decenas de metros. Se debe tener mucho cuidado al diseñar y construir pozos eficientes si se quiere lograr el mejor aprovechamiento del abatimiento disponible. Esto es necesario debido al limitado espesor de los acuíferos.

Los depósitos de los valles pueden existir en aquéllos que al presente se hallan atravesados por corrientes superficiales o pueden consistir de cauces enterrados cuya ubicación guarda muy poca o ninguna relación con la superficie actual de drenaje. Estos valles sepultados se pueden localizar mediante perforaciones de prueba o por reconocimiento geofísico. La región se encuentra densamente poblada e industrializada, de preferencia en los valles. También existen algunos problemas de contaminación fluvial.

Las Planicies Costeras del Atlántico y del Golfo

La región de las *Planicies Costeras del Atlántico y del Golfo* comprende las planicies costeras que se extienden desde Massachusetts en dirección sur a lo largo de la costa atlántica e incluyendo todo el Estado de la Florida y por el oeste hasta Texas. El área incluye la Ensenada de Mississippi por el extremo norte como también el extremo sur de Illinois.

La región se halla abudantemente dotada de agua, tanto superficial como subterránea. Se caracteriza además por la presencia de una cuña que se engruesa y tiene buzamiento en dirección al océano, constituída en su mayor parte por rocas no consolidadas de grava, arena, limo, arcilla, marga y calizas, procedentes de la edad Cretácica y también más recientes. Estos depósitos sedimentarios son el resultado de la erosión de casi dos terceras partes del territorio oriental del país, cuyo residuo ha sido arrastrado en dirección al mar y acumulado a lo largo de la costa por la acción de gran variedad de ríos y corrientes. Conforme los sedimentos se fueron acumulando y el nivel relativo del océano fue declinando, la línea de costa se fue adentrando en el mar hasta alcanzar su posición presente. Sin embargo, el nivel del mar ha fluctuado ampliamente en lugar de declinar con persistencia. El resultado ha sido, en algunos casos, que las formaciones más recientes cubren los afloramientos de las más antiguas.

El espesor de estos estratos varía desde unos pocos centenares de metros en el noreste, hasta quizá unos 12.000 metros en el sur de Louisiana. En cierta área de Texas, el espesor de algunos acuíferos de agua dulce alcanzan hasta 1,800 metros. Los principales acuíferos consisten de lechos de arena o de arena y grava. En la parte sureste de la región se encuentran acuíferos de roca consolidada, tal como la caliza altamente productora de la Florida, del sureste de Georgia y de Carolina del Sur. El agua subterránea escasea en áreas apreciables de Texas, Louisiana y en algunas extensiones menores de Mississippi y Alabama, en donde todos los sedimentos factibles de ser penetrados mediante perforaciones de profundidad normal, son materiales densos y relativamente impermeables.

Alaska

La extensión de Alaska es de casi una quinta parte de todos los otros 48 Estados. Por esta razón y por el hecho de presentar ciertas condiciones especiales relativas a las manifestaciones del agua subterránea, Alaska merece una descripción separada. Geológicamente, Alaska puede ser considerada como el extremo norte de la Cordillera Americana, que al desviarse de su dirección noroeste en Canadá, dobla hacia el oeste y también al sudoeste.

Los recursos de agua subterránea de

Acuíferos capaces de brindar a los pozos rendimientos de moderados a altos.

- Arena y grava de la planicie costera
- Caliza
- Arrastre glacial
- Cauces fluviales
- Valles abandonados

Fig. 44: Los acuíferos de la Planicie Costera del Atlántico y del Golfo son en su mayoría sedimentos costeros, pero existen también importantes formaciones calizas.



Fig. 45: Instalación de una rejilla de acero inoxidable en un pozo municipal de Anchorage, Alaska.

Alaska han sido resumidos por McGuinness[3] en la siguientes palabras:

"Las condiciones del agua subterránea en Alaska son grandemente variables. Como es de imaginar, los principales acuíferos consisten de masas de arena y grava acomodadas en agua, las cuales se hallan incorporadas al residuo glacial que cubre las tierras altas y al arrastre glacial y otros depósitos aluviales que se extienden desde las tierras altas hasta las bajas. Los acuíferos más productivos son aquéllos que se hallan localizados en la vasta Meseta Central. Los depósitos aluviales productivos escasean en el área costera suroriental.

"La disponibilidad de agua subterránea en Alaska se ve limitada por múltiples condiciones. Una de ellas, que no se observa en otras partes de los Estados Unidos, es la presencia tan extendida de suelo permanentemente congelado. En cualquier localidad permanentemente congelada, el suelo que se halla en esta condición empieza a cierto nivel dado por debajo de la superficie y se extiende hasta una profundidad algo mayor.

"El agua subterránea puede manifestarse por encima del suelo permanentemente congelado, en ciertas zonas no congeladas que se hallen dentro de aquél o bien por debajo.

"Alaska, al igual que otros Estados que se hallan en sus etapas iniciales, dispone de grandes recursos hídricos de otra índole y brillantes perspectivas. Los factores limitantes del desarrollo hidráulico podrían ser la falta de capital y de información hidrológica."

Aunque los recursos hidráulicos de Alaska son grandes, el no disponer de agua a un costo razonable es un factor que restringe su uso. Los dos problemas que existen son la presencia de suelo permanentemente congelado en el occidente y norte de la región y la escasez de agua subterránea en el sur.

Hawaii

Las islas de Hawaii están asentadas sobre rocas basálticas volcánicas que han sido extruídas a lo largo de una fisura de 2,500 kilómetros longitud, existente en el piso del Océano Pacífico. En la mayor parte de las áreas la lava basáltica es bastante permeable. Las partes centrales de las coladas individuales de lava son densas, pero los numerosos afloramientos de zonas permeables proveen tantas entradas al agua, por encima y por debajo del nivel del mar,

que el resultado viene a ser el de una alta porosidad y permeabilidad.

La roca permeable se extiende miles de metros por debajo del nivel del mar. La forma que toma el agua subterránea que se manifiesta en cada isla es la de un extenso lente que flota en agua salada del mar.

La precipitación oscila desde unas pocos milímetros hasta varios cientos por año. Parte de esta agua percola a través de la roca porosa hasta alcanzar el nivel de saturación. Lo anterior logra elevar la superficie freática hasta niveles que se hallan a 10 ó 20 mts. por encima del nivel del mar.

Cuando la extracción de agua subterránea por bombeo hace descender el nivel freático local, ello puede dar lugar a que se presente la invasión de agua salada hasta el sitio de bombeo.

En ciertas áreas que se hallan a elevaciones muy por encima de la superficie freática principal, se manifiesta agua subterránea a niveles altos. Lo anterior tiene lugar cuando el movimiento normal de percolación queda bloqueado por la presencia de diques o rocas intrusivas de baja permeabilidad que se hallan contenidas dentro de la roca porosa. En ciertas áreas, entonces, el agua subterránea se embalsa detrás de estos diques subsuperficiales. Es así como descarga luego, en forma natural, a través de zonas porosas de nivel inferior, cuando la superficie freática está lo suficientemente alta como para que el agua rebose por encima de las paredes formadas por los diques.

El agua subterránea suministra alrededor de dos quintas partes del abastecimiento total del estado.

Las Unidades Regionales Facilitan los Estudios

Al dividir un país en regiones acuíferas, se facilita la descripción del marco físico y la disponibilidad general de los recursos hidráulicos subterráneos de la nación. La designación de tales regiones, en que cada una abarca una gama de pequeñas pero suficientes condiciones geológicas e hidrológicas, permite llegar a generalizaciones muy útiles de la situación del recurso subterráneo. Lo anterior conduce a la implantación de sanas medidas para el óptimo uso del recurso, como también a la realización de estudios que son necesarios para la mejor comprensión del problema.

En este aspecto, las publicaciones de Meinzer, Thomas y McGuinness le han brindado mucha información útil a los Estados Unidos. La primera parte de este capítulo constituye tan sólo una forma abreviada del sumario de todas sus ideas.

Las Regiones Acuíferas de Venezuela

La división de Venezuela en regiones acuíferas, constituye otro ejemplo de esta manera de analizar el potencial de agua subterránea de una nación. El Dr. Oswaldo De Sola, Director de la Escuela de Geología, Minas y Metalurgia de la Universidad Central de Caracas, ha publicado un mapa y una descripción de las regiones y provincias acuíferas del país.[4]

Tabla VI

Regiones Acuíferas	Provincias Acuíferas
(A) Zulia - Falcón	Golfo de Venezuela Lago Maracaibo Altiplanicies de Falcón
(B) Cadenas Montañosas	Perijá Andes Cadena y Cuencas Costeras El Baúl
(C) Grandes Planicies	Planicie Occidental Planicie Central Planicie Oriental Delta del Orinoco
(D) Guayana	Guayana

El Dr. De Sola denomina a estas áreas "Regiones o Provincias hidrogeológicas, cada una de características geomorfológicas comunes, en las que los acuíferos se han formado mediante procesos geológicos similares". Sus divisiones se muestran en la Figura 46 y en la Tabla VI anterior.

La región de Zulia-Falcón abarca tres provincias: las planicies costeras del Golfo de Venezuela; las planicies de tres lados del Lago Maracaibo y las tierras altas del Estado de Falcón.

La Región de Zulia — Falcón

En las provincias de las planicies, el agua subterránea se manifiesta en las formaciones arenosas y a diversas profundidades. Los acuíferos arenosos que se hallan alrededor del Golfo de Venezuela son del tipo freático o libre.

En la parte oriental de la Provincia del Lago Maracaibo, el agua subterránea se encuentra en condiciones artesianas y dentro de formaciones cuyas profundidades son de 400 a 500 metros. El agua está altamente mineralizada. Al oeste del Lago Maracaibo, el agua subterránea tiene lugar en la forma de extensos acuíferos freáticos. A menudo el agua es corrosiva. Algunas veces los acuíferos de agua dulce están conectados con formaciones que contienen agua salobre o salada. La invasión de agua salada puede presentarse a lo largo de la costa del Lago.

Al sudoeste del Lago Maracaibo se encuentran aeuíferos de considerable extensión constituídos por sedimentos no consolidados y en los cuales el agua subterránea puede ostentar características tanto freáticas como artesianas. El agua de los acuíferos artesianos es de mejor calidad que la de los freáticos.

En la Provincia de Las Tierras Altas de Falcón el agua subterránea aparece en las aberturas de rocas consolidadas. Los rendimientos de los pozos son pequeños. Algunos valles orientales del Estado de Falcón se encuentran rellenos con materiales no consolidados. En estas cuencas existen acuíferos de extensión limitada.

La Región de las Cadenas Montañosas.

La región de las Cadenas Montañosas abarca cuatro provincias. En las provincias de Perijá y Andes, el agua subterránea se manifiesta a través de las aberturas producidas por fracturación en las rocas consolidadas y en los sedimentos de valles longitudinales. Los rendimientos son pequeños, excepto en una área conocida como la depresión de Carora—Barquisimeto en la provincia acuífera de Andes. En los sedimentos que constituyen el relleno de esta cuenca, se encuentran localizados acuíferos extensos.

La Provincia de la Cadena y Cuencas Costeras, comprende tres áreas de cuencas, a saber: Yaracuy, El Lago Valencia y Tuy. En el relleno del valle aluvial de Yaracuy, desde el pie de la meseta de Barquisimeto por el norte, y hacia el noroeste hasta la costa del Caribe, tienen lugar grandes acumulaciones de agua subterránea. En la cuenca del Lago Valencia en Aragua, existen acuíferos freáticos y artesianos relativamente grandes. Las formaciones de arena más profundas contienen al agua de mejor calidad.

En el área de Tuy, los acuíferos no consolidados contienen agua en condiciones tanto freática como artesiana. Estos acuíferos no brindan su agua libremente; la mayor parte del agua subterránea se encuentra altamente mineralizada. El potencial de agua subterránea de la cuarta provincia, El Baúl, no se conoce. Sin embargo, abunda el agua superficial.

La Región de las Grandes Planicies

La región de las Grandes Planicies abarca cuatro provincias. La Provincia de las Planicies Occidentales posee acuíferos de gran extensión y alta producción. En ella tiene lugar agua subterránea de buena calidad, tanto freática como artesiana. La Provincia de las Planicies Orientales asimismo contiene acuíferos freáticos de alto

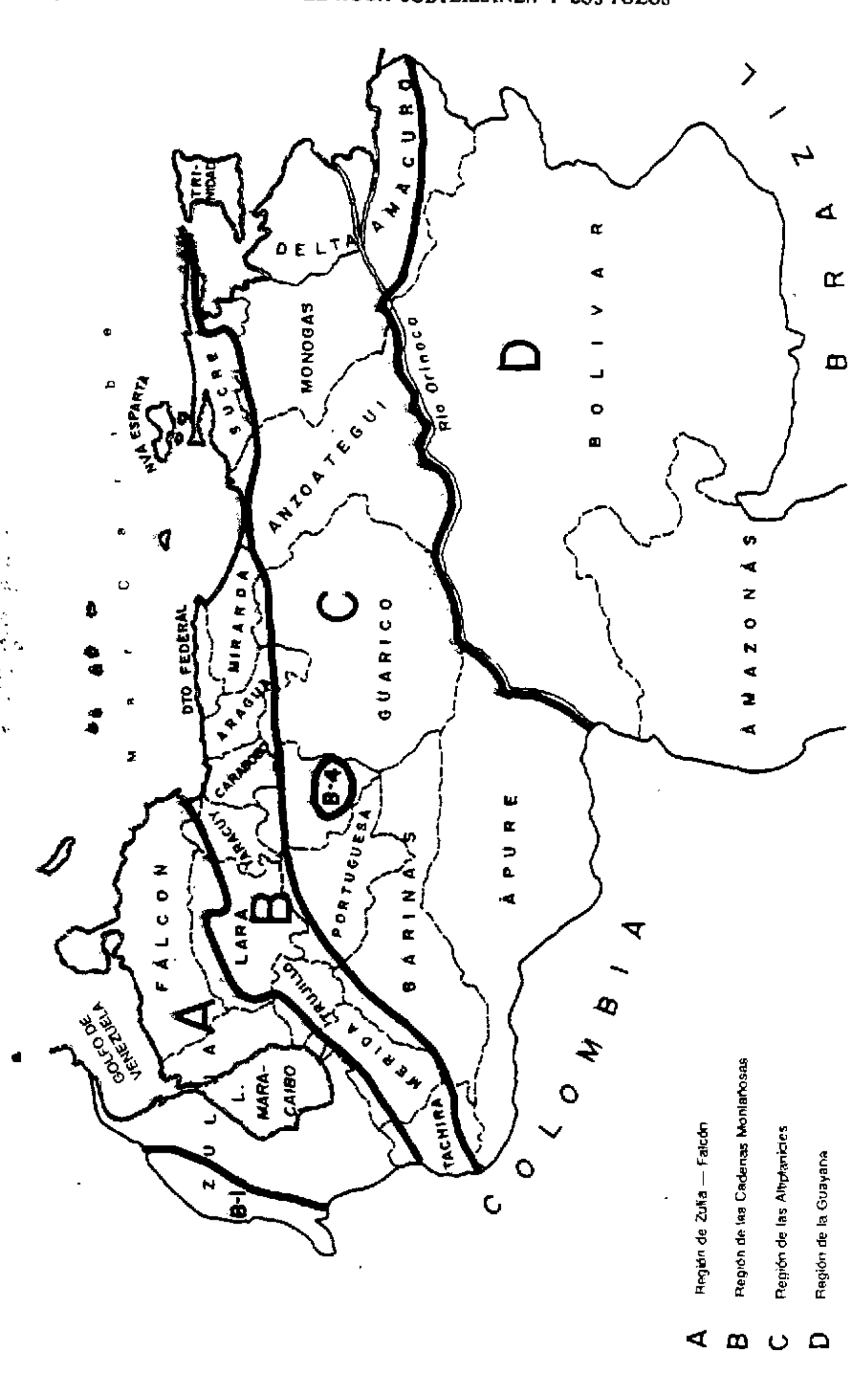


Fig. 46: Las cuatro principales regiones acuíferas de la República de Venezuela. (Después de De Sola).

rendimiento, pero en sedimentos algo más antiguos que los del oeste.

En contraste con las áreas aledañas, la Provincia de las Planicies Centrales incluye grandes áreas de materiales subsuperficiales impermeables. Existen, sin embargo, algunos acuífero artesianos de baja producción, pero sus aguas son salobres o saladas.

La Provincia del Delta del Orinoco se cree que posee extensos acuíferos en los sedimientos Deltáicos del Río Orinoco. Posiblemente el agua sea de buena calidad. Como abunda el agua en la superficie, poco se conoce acerca del agua subterránea.

Los recursos de agua subterránea de la región de la Guayana se conocen poco debido a las grandes cantidades disponibles de agua superficial. Se sabe que en algunos valles existen extensas formaciones acuíferas de material no consolidado. Es posible también que las zonas de fracturación de las rocas del Pre-Cámbrico constituyan acuíferos aprovechables. La calidad del agua subterránea es satisfactoria.

Referencias

1. MEINZER, O. E. "Occurrence of Ground Water in the United States." Water Supply Paper 489 (1923), pp 193-314. U. S. Geological Survey, Washington, D. C.
2. THOMAS, H. E. "Ground-Water Regions of the United States — Their Storage Facilities," Interior and Insular Affairs Committee Report (1952), pp. 14-72, U. S. Congress, Washington, D. C.
3. McGUINESS, C. L., "Role of Ground Water in the National Water Situation." Water Supply Paper 1800 (1963), pp 28-79, U. S. Geological Survey, Washington, D. C.
4. De SOLA, OSWALDO, "Provincias Hidrogelógicas Venezolanas," Tema II, Desarrollo de Aguas Subterráneas (1964), pp. 36-40, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Capitulo 4

El Carácter Químico del Agua Subterránea

EL MOVIMIENTO relativamente lento del agua que percola a través del suelo le permite a ésta mantener un contacto prolongado y estrecho con los minerales que constituyen la corteza terrestre. Estos minerales son solubles en mayor o menor grado, de tal suerte que el agua aumenta su contenido mineral conforme se desplaza, hasta que se alcanza un balance o equilibrio combinado de las sustancias en solución. Son muchas las variables del medio ambiente que afectan los procesos químicos; se han encontrado amplias variaciones en el carácter químico del agua subterránea, aún dentro de pequeñas regiones.

La utilidad del agua para varios fines se ve afectada por su contenido de minerales disueltos. Si uno o más minerales exceden de la cantidad que puede tolerarse para un uso determinado, debe aplicarse al agua algún tipo de tratamiento que elimine el mineral indeseable y torne al agua apta para el propósito al que se le va a destinar.

La mayoría de las aguas subterráneas no contiene materia en suspensión y prácticamente está libre de bacterias. Por lo general es clara y sin color. Estas características contrastan con las del agua superficial, puesto que ésta última es corrientemente turbia y contiene considerable cantidad de bacterias. Por esta razón, el agua subterránea resulta ser de una calidad sanitaria superior. Su temperatura es relativamente constante, factor muy importante en algunos casos.

Análisis Mineral del Agua

El uso que se le vaya a dar al agua o los datos de prueba, es lo que en gran parte determina el número de constituyentes o propiedades que por lo general se determinan mediante un análisis de agua. Existen más de 50 propiedades que deberían determinarse, pero un análisis tal sería mucho más detallado que el que se requiere para obtener una idea de la calidad del agua subterránea que se va a usar en propósitos domésticos, industriales, municipales o de riego.

Ciertas propiedades que resultan del contenido y posibles combinaciones de los minerales presentes en solución, reflejan la utilidad del agua para varias condiciones.

Los materiales disueltos del agua se determinan mediante procedimientos de análisis de laboratorio bien establecidos. El resultado de estos análisis se reporta en términos de muy diferentes unidades de medida. La Tabla VII muestra algunas de éstas.

Unidades de Medida

La práctica más generalizada en los Estados Unidos es la de reportar los materiales disueltos en partes por millón por peso (ppm). Lo anterior significa una parte, por peso, del mineral disuelto, contenida en un millón de partes, por peso, del la solución que lo contiene.

Muchos laboratorios reportan los análisis en unidades tales como miligramos por litro (mg por l). Miligramos por litro se aceptan generalmente como equivalentes a partes por millón, asumiendo que un litro de agua pesa un kilogramo (un millón de miligramos). El peso anterior es estrictamente cierto sólo en el agua pura a una temperatura de 3.98°C.

En los países en donde se usa el sistema inglés de medidas, la dureza se expresa corrientemente en granos por galón. Un grano por cada galón americano es igual a 17.12 ppm. Puesto que los galones inglés y americano no son iguales, es importante decir cuál tipo de galón se está empleando, al reportar. Para convertir partes por millón a granos por galón americano, multiplíquese por 0.058.

Los análisis también se expresan en equivalentes por millón, para algunas veces describir algo de la composición de los minerales disueltos en el agua. Los equivalentes por millón se calculan dividiendo el valor de concentración de una sustancia, expresado en partes por millón, por su peso de combinación. El peso de combinación es igual al peso atómico o peso molecular de un ión, tal como el calcio, dividido por su carga iónica.

El agua dulce es una solución muy diluída. Cuando las sustancias minerales se disuelven en ella, se separan — los químicos dicen que se disocian — en forma de partículas cargadas eléctricamente, denominadas iones. Por ejemplo, el bicarbonato de calcio, al disolverse en agua, se separa en iones de calcio con carga eléctrica positiva y en iones de bicarbonato, con una carga eléctrica negativa. La sal común, cloruro de sodio, se separa o disocia en iones de sodio positivamente cargados, e iones de cloruro de carga negativa. Los análisis de agua se expresan por lo general como concentraciones de iones individuales. Cuando se habla de la cantidad de cloruros en el agua, se está refiriendo a la cantidad de iones cloruro presentes, ya sea que éstos provengan de la disolución del cloruro de calcio, cloruro de sodio o cloruro de magnesio.

Tabla VII

Unidades de Medida	Equivalente en ppm.
Mg. por litro	1.00
Granos por galón americano	17.12
Granos por galón imperial	14.27
Grado francés	10.00
Grado alemán	17.80

Una discusión de cómo los minerales disueltos en el agua afectan su utilidad, es, en consecuencia, una revisión de las actividades de sus iones. A menudo resulta conveniente referirse a algunos de los minerales como si éstos se hallasen en forma combinada como sustancias sólidas, pero recordando al mismo tiempo que los iones no están en realidad combinados una vez que las sustancias se disuelven.

Las propiedades generales del agua que resultan especialmente útiles para revelar el carácter de ésta, son: dureza, conductividad eléctrica específica, la concentración de iones de hidrógeno (pH), el dióxido de carbono libre y los sólidos totales disueltos.

Dureza

La dureza del agua se demuestra más corrientemente mediante la cantidad de jabón necesaria para producir espuma. La dureza podría llamarse la propiedad del agua para desperdiciar jabón, pues mientras los minerales que causan la dureza no se hayan eliminado al combinarse con el jabón, no se producirán espumas en el agua dura. El material removido por el jabón se evidencia por una escoria insoluble — el conocido anillo que se observa en la tubería y que se forma durante el proceso de lavado.

Así toda la dureza del agua la producen el calcio y el magnesio. Las siguientes sales minerales pueden ser las fuentes que producen los iones de calcio y magnesio presentes en el agua:

- Bicarbonatos de calcio y magnesio
- Sulfatos de calcio y magnesio
- Cloruros de calcio y magnesio
- Nitratos de calcio y magnesio

En la solución se encontrarán como producto de la disolución de estos compuestos, tanto los iones metálicos de calcio y magnesio como los correspondientes de bicarbonato, sulfato, cloruro y nitrato.

Parte del calcio y del magnesio presentes en el agua dura contribuyen a formar las incrustaciones que se desarrollan cuando el agua sufre cambios de temperatura y presión. La incrustación referida se presenta cuando el balance de la solución se altera, dando por resultado la formación de los carbonatos insolubles de estos metales y, en algunos casos, sus sulfatos. A continuación se explica cómo tiene lugar lo anterior.

Los iones de bicarbonato están presentes en el agua subterránea como resultado del dióxido de carbono disuelto. El dióxido de carbono ayuda al agua a disolver la caliza o la dolomita con las cuales ésta entra en contacto. Estas rocas consisten de carbonatos de calcio y magnesio. Al disolverse, éstas suministran los iones de calcio y magnesio que causan la dureza. Los carbonatos cambian a bicarbonatos mediante una débil combinación con una parte del dióxido de carbono disuelto. Para producir un contenido de bicarbonato de 100 ppm, se requiere que 44 ppm de dióxido de carbono libre se combinen con los iones de carbonato en el momento en que la roca, en su forma carbonática, se disuelve.

Tal como se indicó, este dióxido de carbono se halla vagamente incorporado al ión de bicarbonato. Calentando el agua, puede expulsarse una parte en forma de gas. Cuando esto ocurre, parte de los bicarbonatos cambian a carbonatos. Los carbonatos tienen la tendencia a reaccionar con parte de los iones de calcio y magnesio, formando así costras insolubles de carbonato de calcio y de magnesio.

La costra de carbonato de calcio se deposita de primera, ya que es más insoluble que la de carbonato de magnesio. En ausencia de dióxido de carbono, el agua contiene en solución únicamente alrededor de unas 14 ppm de carbonato de calcio. En las mismas condiciones, la solubilidad del carbonato de magnesio es de alrededor de 5 veces más grande, o sea, unas 80 ppm.

La dureza total del agua se puede dividir en dos tipos — dureza de *carbonatos* y dureza de no carbonatos. La dureza de *carbonatos incluye* las partes de calcio y magnesio que podrían combinarse con el bicarbonato y la pequeña cantidad de carbonato presentes. Esto es lo que se acostumbra llamar dureza temporal, puesto que se elimina virtualmente mediante ebullición, la que según ya vimos, precipita los carbonatos de calcio y magnesio.

La dureza de no carbonatos — que anteriormente se denominaba dureza permanente — viene dada por la diferencia entre las durezas total y de carbonatos. La producen aquellas cantidades de calcio y magnesio que *normalmente combinarían* con los iones presentes de sulfato, cloruro y nitrato, además del efecto endurecedor de algunos otros constituyentes menores. Esta parte de la dureza no es eliminable mediante ebullición.



Fig. 47: Instalaciones de laboratorio de Johnson Division, UOP Inc., para analizar los minerales disueltos en el agua y estimar así el efecto de ésta en las rejillas para pozos.

El agua que contiene una dureza menor de 50 ppm se considera suave. Una dureza de 50 a 150 ppm carece de importancia en la mayoría de los casos, pero la cantidad de jabón requerida aumenta conforme crece aquélla. Las lavanderías y otras industrias que utilizan grandes cantidades de jabón, encuentran por lo general que es económico reducir la dureza hasta 50 ppm. Cuando las aguas contienen de 100 a 150 ppm de dureza, depositan gran cantidad de costras en las calderas de vapor.

Las durezas mayores de 150 ppm son definitivamente palpables. Cuando los niveles de dureza alcanzas hasta 200 y 300 ppm o más, se impone el suavizar el agua para usos domésticos. La dureza se reduce hasta unas 85 ppm cuando se aplican tratamientos suavizadores a los sistemas municipales de agua. No se considera económico suavizar más el agua de un sistema total de abastecimiento público.

Debe destacarse que el uso de valores numéricos de dureza, para definir una agua suave o dura, es aún dudoso, puesto que estos términos expresan solamente significados relativos para diferentes personas. Una persona que viva en Nueva Inglaterra, en donde el agua contiene normalmente pequeñas cantidades de sólidos disueltos, considerará como muy dura una agua con solamente 100 ppm de dureza. Contrariamente, los residentes de Iowa, Minnesota o Nebraska sentirán como suave una agua con 100 ppm de dureza.

Conductividad Eléctrica Específica

La conductividad eléctrica es la habilidad de una determinada sustancia para conducir la corriente eléctrica. Es justamente lo opuesto de la propiedad denominada resistencia eléctrica. La conductividad de cada material, al igual que su resistencia, es diferente. Para establecer una comparación de las propiedades conductoras de diferentes materiales, existe un patrón denominado "conductividad eléctrica específica" que se define como la conductividad de un cubo de sustancia, de un centímetro de lado.

El agua químicamente pura ostenta una conductividad eléctrica muy baja, significando esto que es un buen aislante. Sin embargo, con la adición de una pequeñísima cantidad de minerales disueltos, el agua se vuelve conductiva. Esto tiene lugar cuando el material disuelto se separa en iones que llevan sus cargas negativas y positivas. Cuanto mayor la cantidad de iones, mayor será la conductividad de la solución.

La unidad de medida de la conductividad es el inverso de ohmios, la unidad para expresar la resistencia, y se escribe "mhos", pronunciándose "mos". Los valores de la conductividad específica de las aguas subterráneas se reportan en millonésimas de mhos, o "micromhos".

En aquellas soluciones tan diluidas como son la mayoría de las aguas subterránes, la conductividad específica varía directamente con la cantidad de minerales disueltos

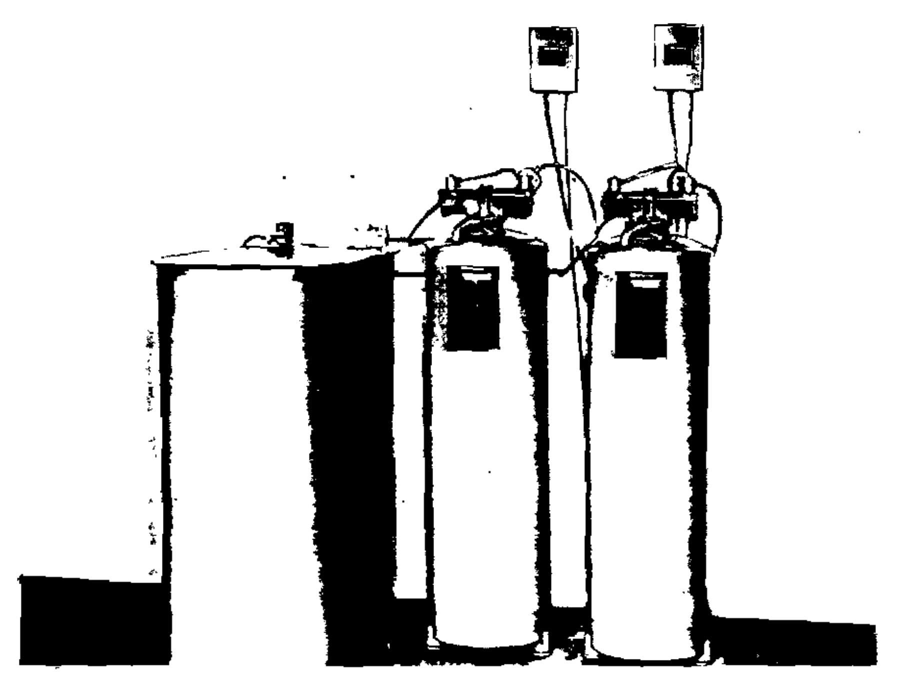


Fig. 48: Un suavizador enteramente automático de agua, que reduce la dureza de esta hasta cero. Los iones de calcio que causan la dureza, son intercambiados por iones de sodio conforme el agua pasa a traves de lechos de *esferitas de resina*.

contenida en el agua. Pero la conductividad específica de soluciones de diferentes minerales, no es la misma. Por ejemplo, 100 ppm de cloruro de sodio (sal común) le imprime al agua una conductividad específica diferente a la que le daría 100 ppm de bicarbonato de calcio.

La tabla siguiente muestra una comparación de los valores para soluciones de estas dos sales minerales:

Tabla VIII
Conductividad de Dos Soluciones Salinas

Concentración *de la sal* disuelta en ppm	Conductividad Específica a 25°C, *en micromhos*	
	Cloruro de Sodio	Bicarbonato de Calcio
50	93	62
100	187	125
200	370	250
400	750	500

La conductividad de una solución en agua, de materia mineral, aumenta conforme la temperatura se eleva. En consecuencia, para comparar valores medidos, todos deben referirse a la *misma temperatura*.

El diagrama siguiente muestra la relación existente entre la cantidad de sólidos disueltos totales y la conductividad específica, en muestras de agua obtenidas del Río Gila, en Arizona. Dentro de los límites de los valores mostrados en la gráfica, se observa que los sólidos totales de una muestra de agua de este río, pueden estimarse con precisión, si se conoce su *conductividad específica*. *Al multiplicar*, en este caso, la conductividad específica por un factor de alrededor de 0.6, se obtienen los sólidos disueltos.

Para obtener una buena aproximación de los sólidos disueltos en la mayoría de las aguas subterráneas naturales, se debe multiplicar la conductividad específica por un factor que varía entre 0.55 y 0.75. Cuando se trata de aguas salinas, el factor es por lo general mayor, y en aguas con ácido libre puede ser mucho menor.

Es conveniente estimar la cantidad de sólidos disueltos totales mediante la medición de conductividad, puesto que ello puede hacerse muy rápidamente.

Las aguas con una conductividad específica alta, causan corrosión del hierro y del acero, aunque otras propiedades no indiquen la posibilidad de un problema de corrosión. Puesto que la conductividad específica refleja la actividad de los iones cargados eléctricamente en el agua, se desprende que cuánto mayor la conductividad, más grande será la oportunidad para una acción electro-química.

Concentración del Ión Hidrógeno (pH)

La concentración relativa de los iones de hidrógeno en el agua, es la que indica si ésta actuará como un ácido débil, o si se comportará como una solución alcalina.

Cuando la cantidad de iones de hidrógeno es excesiva en relación con otros iones en solución, tiene lugar una reacción ácida. Una agua tal, tiende a atacar los metales.

La concentración del ión hidrógeno del agua se expresa mediante su valor del pH. Un valor del pH de 7 indica una solución neutra, o sea, ni alcalina ni ácida. Un valor de pH menor de 7, indica una condición ácida; un pH mayor que 7, corresponde a una solución alcalina.

Una molécula de agua, H_2O, tiene una ligera tendencia a quebrarse en iones, en la misma forma en que lo hacen algunos de los minerales disueltos al ionizarse. Los iones son átomos o grupos de átomos que contienen cargas eléctricas positivas o negativas. El símbolo químico H_2O, puede escribirse también HOH. Cuando la molécula de agua se ioniza, se divide en un ión positivo de hidrógeno ($H+$) y otro ión

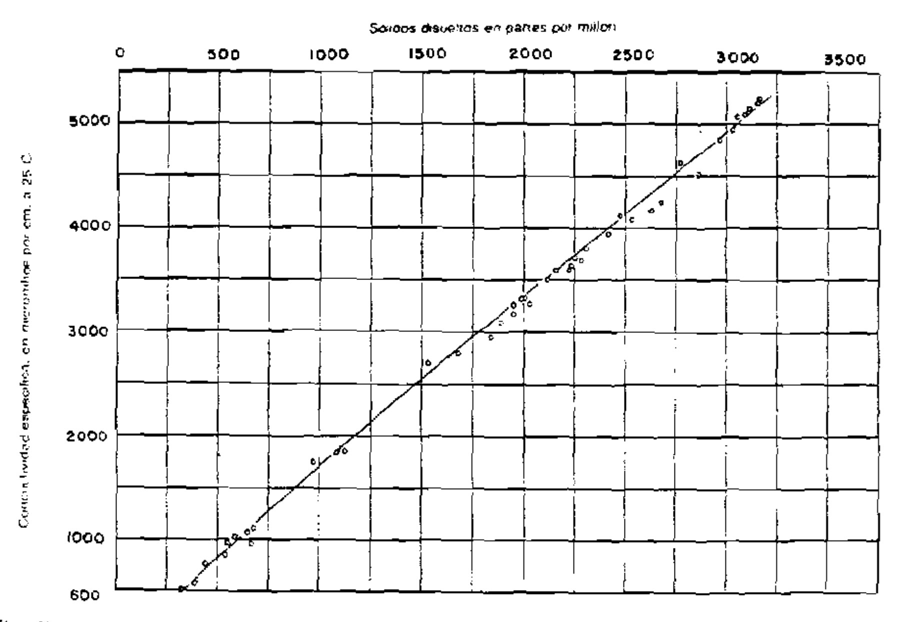


Fig. 49: Correlación entre sólidos disueltos y conductividad específica, obtenida mediante análisis del agua de muestras diarias tomadas del Ríodo de 12 meses. Se observa la relacion constante existente entre la conductividad y el contenido mineral del agua. *Cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos*

negativo (OH−) denominado el ión hidroxilo.

En el agua pura, una pequeña cantidad de las moléculas se ioniza de esta manera. El número de iones de hidrógeno que se forman es tal, que su concentración por litro de agua se expresa mediante un valor del pH de 7.

Escala de los Valores del pH

La escala de los valores del pH es tal, que un cambio de una unidad en éste, representa un cambio de 10 veces en la concentración del ión H. Supongamos, por ejemplo, que la adición de un poco de ácido al agua destilada cambia su pH a 6. Lo anterior significa que el número de iones H ha sido aumentado en 10 veces por la adición del ácido. En forma semejante, una agua con valor de pH de 8 contiene solamente 1/10 de los iones H presentes en el agua destilada y un valor del pH de 9 representa solamente 1/100 de los que habría a un valor neutro de 7.

El número de iones negativos OH, varía en la forma opuesta. Así pues, una agua con un valor del pH de 9, contiene 100 veces más iones OH, que una agua con un valor neutro del pH de 7. Los iones OH son los que le imprimen al agua su reacción alcalina, de manera, pues, que una agua de pozo con un valor de pH de 9, resulta ser francamente alcalina.

El pH de la mayor parte de las aguas subterráneas queda definido por la cantidad de gases del dióxido de carbono disuelto y por los carbonatos y bicarbonatos disueltos en las sales minerales. El dióxido de carbono gaseoso (CO_2) disuelto en agua, forma ácido carbónico. En agua destilada, una pequeña cantidad de este débil ácido baja apreciablemente su pH. Sin embargo, si se halla presente una pequeña cantidad de alguna sal alcalina, digamos bicarbonato de calcio o de magnesio, el pH no desciende mucho debido a la presencia de una cantidad dada de dióxido de carbono disuelto.

Así pues, la relación de dióxido de carbono a bicarbonato, constituye la regulación principal del pH en la mayor parte de las aguas subterráneas. Sin embargo, esta relación deja de ser estable cuando tienen lugar cambios en la temperatura o en la presión. Por ejemplo, la reducción de la presión permite el escape de algo de dióxido de carbono. Al bombear de un pozo, se puede producir la liberación de dióxido de carbono, puesto que el abatimiento que se produce reduce la presión de la masa líquida en igual proporción.

De lo anteriormente expuesto se deduce que una muestra de agua que se tome de un pozo, no representa el verdadero carácter químico del agua del acuífero. Cerrando herméticamente el recipiente con que se toma la muestra, se preservará todo el dióxido de carbono que estaba presente en el agua cuando aquélla se obtuvo, pero una parte del gas ya habría escapado conforme el agua se bombeaba y antes de obtener la muestra.

La situación descrita hace que las determinaciones del pH en el campo sean preferibles a las del laboratorio, especialmente cuando se trata de estudios cuidadosos en busca de la determinación del papel que juegan los minerales disueltos en la corrosión o incrustación de las rejillas de pozos.

De acuerdo con Hem,[3] la mayor parte de las aguas subterráneas que se encuentran en los Estados Unidos tienen un pH que va desde alrededor de 5.5 hasta algo más de 8. Aquéllas con valores de su pH inferior a 4.5, probablemente contienen ácidos minerales libres, provenientes de aguas de minas, gases volcánicos o que se hallan contaminadas por desechos industriales.

Sólidos Disueltos Totales

La concentración total de minerales disueltos en el agua es un índice general de la adaptabilidad del agua para diversos usos. Los términos, "sólidos totales", (ST), sólidos disueltos totales, o sólidos disueltos, se usan más o menos como sinónimos. Los sólidos totales disueltos se pueden determinar a partir del residuo seco que queda de una muestra de agua que se haya dejado evaporar. También se puede calcular sumando las concentraciones determinadas por separado de todos los iones presentes en el agua.

Los sólidos disueltos calculados serán por lo general ligeramente menores que el residuo dejado por la evaporación. La diferencia puede alcanzar de 10 a 20 ppm en aquellas aguas que contengan de 100 a 500 ppm de sólidos disueltos, y puede ser mayor en el caso de aguas altamente mineralizadas.

El agua que contiene mucha materia mineral disuelta no es satisfactoria para ciertos usos. Si el agua contiene menos de 500 ppm de sólidos disueltos, es por lo general adecuada para uso doméstico y para varios propósitos industriales. Aquella agua con más de 1,000 ppm de sólidos disueltos, contiene por lo general minerales que le imprimen un sabor desagradable o la hacen *inapropiada* en otros aspectos.

En vista de lo anterior, las aguas cuyo contenido de sólidos disueltos es alto, deben considerarse como potencialmente corrosivas para las rejillas de pozos y para otras partes de la estructura del pozo, aparte de otras características que pueda revelar su análisis mineral.

Hierro

Prácticamente todos los suministros de agua contienen algo de hierro. El contenido de hierro del agua es de considerable importancia, ya que aún los pequeños contenidos afectan seriamente la utilidad del agua para ciertos propósitos domésticos o industriales. Los estándares del USPHS (Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos), sugieren que el contenido de hierro del agua que se use para beber, no debe ser mayor de 0.3 ppm. Este límite se ha fijado por consideraciones que no son de tipo fisiológico. Muchas veces, esta cantidad no produce efectos dañinos ya sea en seres humanos o animales. De hecho, pareciera que el ser humano necesita de 5 a 6 miligramos de hierro cada día, que equivale a un volumen de 17 a 20 litros de agua con 0.3 ppm.

Es significativo observar que 0.3 ppm es una cantidad menor de la que consideramos como meras trazas de un número de otros minerales que rara vez se determinan en un análisis de agua.

El hierro en el agua causa pátinas en los accesorios de plomería, manchas en las ropas durante el lavado, incrustación en las rejillas de pozos y obstrucción de las tuberías. Cuando la cantidad excede de 0.5 ppm se presentan por lo general problemas. Algunos procesos industriales no toleran más de 0.1 ppm. En el agua subterránea son comunes concentraciones del orden de 1 a 5 ppm. Después de aerear el agua, esta concentración puede bajar hasta 0.1 ppm.

El agua puede adquirir hierro por contacto con ademes de pozos, partes de una bomba y de las tuberías. Cuanto más corrosiva el agua, más metal disolverá de las superficies de hierro con las cuales permanece en contacto.

El agua contenida en un pozo que ha permanecido en desuso, tendrá un contenido mayor de hierro que el agua del acuífero. Al obtener muestras de agua, deberá ponerse a funcionar la bomba suficiente tiempo como para remover toda el agua que ha permanecido quieta dentro del pozo. Una vez que el agua haya aclarado completamente, deberá obtenerse la muestra de un punto lo más cercano a la descarga de la bomba y antes de que haya entrado en contacto con el aire.

La química del hierro contenido en el agua, es muy compleja. Generalmente tienen lugar dos clases de iones de hierro. Una es el hierro *ferroso* y la otra es el hierro *férrico*. Los iones de hierro ferroso tienen cargas equivalentes a 2 electrones. Los de

hierro férrico, equivalen a la carga de 3 electrones. El hierro en su estado ferroso es inestable en presencia del aire y cambia al estado férrico, cuando el agua natural que contiene iones ferrosos queda expuesta al aire. El hierro ferroso se oxida a férrico, por medio de aereación.

El hierro ferroso puede disolverse en agua aproximadamente neutra en cantidades de alrededor de 50 ppm y en cantidades aún mayores, en agua ligeramente ácida. Por lo contrario, el hierro férrico resulta ser casi completamente insoluble en agua alcalina o débilmente ácida.

Esto nos da el indicio del problema causado por la presencia de hierro en el agua. Una vez en contacto con el aire, el hierro disuelto que se halla en estado ferroso, cambia al estado férrico y abandona la solución. Los compuestos químicos que se forman mediante esta aereación consisten de hidróxido de hierro y óxido de hierro, que son los mismos compuestos que forman el herrumbre que se deposita en las superficies metálicas expuestas al aire.

Cuando se bombea agua subterránea que contiene hierro en cantidad apreciable, ésta puede aparecer en un principio clara y sin color. Dejada en quietud por un tiempo, el contacto con el oxígeno del aire hace que el hierro disuelto se afecte. El agua comienza a enturbiarse un poco, y posteriormente se observará en el fondo del recipiente que la contiene, un material depositado del color del herrumbre.

Las aguas portadoras de hierro favorecen el crecimiento de bacterias ferrosas, tal como la crenothrix. Estos desarrollos se forman abundantemente en las tuberías de agua, sistemas recirculantes y en otros lugares, al extremo de ejercer una acción obstructora tal que impiden el flujo. Frecuentemente estas proliferaciones se rompen desprendiéndose en grandes masas obstructoras.

Las bacterias ferrosas se presentan varias formas, pero la crenothrix es la más común.

Todas las bacterias se presentan envueltas por un revestimiento de filamentos. Estos crecen adhiriéndose a las paredes del pozo y del ademe, a las galerías de infiltración y dentro de los vacíos del material acuífero.

Estos organismos pueden cambiar ciertas formas de hierro disuelto al estado férrico insoluble. El hierro insoluble es depositado en el recubrimiento de los organismos o en los vacíos de la arena. El recubrimiento que se desarrolla conforme la bacteria se multiplica, es como una jalea viscosa que puede obstruír seriamente los poros de la formación acuífera y las ranuras o aberturas de la rejilla del pozo. Las bacterias ferrosas proliferan mejor en la oscuridad y se encuentran con más frecuencia en aquellas aguas que contienen poco o nada de oxígeno y gran cantidad de dióxido de carbono conjuntamente con hierro disuelto.

Cuando el contenido de hierro de la fuente de agua es excesivo, la solución final para su eliminación es el tratamiento por remoción. En aquellos casos en que el contenido de hierro y de dióxido de carbono del agua subterránea es moderadamente bajo, y no se emplea tratamiento para remoción, las dificultades pueden reducirse si se tiene cuidado de evitar la aereación.

Manganeso

El manganeso se parece al hierro en cuanto a su comportamiento químico y su manifestación en el agua natural. El manganeso es menos abundante que el hierro en las rocas. Como consecuencia, su manifestación en el agua es menos común y las concentraciones son mucho menores que las del hierro.

La presencia de manganeso en el agua es tan objetable como la del hierro. Este se manifiesta como bicarbonato manganoso soluble el cual cambia a hidróxido de manganeso insoluble al reaccionar con el oxígeno del aire. Las pátinas causadas por el manganeso son más molestas y difíciles de remover, que las causadas por el hierro

El bicarbonato de manganeso se descompone en la misma forma en que lo hace el bicarbonato ferroso, y se precipita en la solución como un depósito negro como el hollín, al liberarse el dióxido de carbono contenido en el agua. La reacción química necesita del oxígeno del aire.

Una bacteria que forma una viscosidad parecida a la bacteria ferrosa, puede también causar la oxidación de los compuestos de manganeso hasta llevarlos a una forma insoluble.

Agregando una pequeña cantidad de hexametafosfato de sodio a una solución, se puede lograr evitar que tanto el hierro como el manganeso abandonen ésta. Este polifosfato estabiliza el compuesto de hierro y de manganeso y retrasa su precipitación. El tiempo de retraso varía con la cantidad de polifosfato agregado. El reactivo químico estabilizador debe agregarse al agua antes de que ésta sea expuesta al aire, de modo que tanto el hierro como el manganeso puedan ser fijados tan pronto como sea posible.

Sílice

El silicio constituye el segundo de los elementos que más abundan en la corteza terrestre. Solamente el oxígeno le aventaja en abundancia. El silicio combinado con el oxígeno en la forma de óxido SiO_2 se denomina sílice.

El cuarzo es casi sílice puro en forma cristalina. El sílice tiene lugar en otras rocas en forma no cristalina. El agua disuelve solamente partículas sumamente pequeñas de cuarzo; sin embargo, las aguas subterráneas contienen a menudo hasta 100 ppm de sílice, y contenidos de hasta 20 ppm son comunes.

Se cree que la presencia de sílice en el agua subterránea proviene de la descomposición de silicatos minerales los cuales se hallan presentes en grandes cantidades en varias rocas. La meteorización de las rocas, que las transforma en minerales arcillosos, da por resultado la formación de algún sílice. La temperatura, la cantidad de agua disponible y el movimiento de ésta a través de las rocas, afectan la meteorización y el grado hasta el cual el sílice entra en solución en el agua.

El sílice no contribuye a la dureza del agua. No obstante, el sílice constituye una parte importante de los incrustantes o costras formadas por algunas aguas. Tal como es depositada, la costra es por lo general silicato de calcio o de magnesio. La costra de silicato no puede ser disuelta por los ácidos u otros reactivos químicos que se utilizan en el tratamiento químico de los pozos.

Sodio

El sodio es un metal, parte de un grupo que se denomina metales alcalinos. Otro metal alcalino es el potasio. Aunque los metales alcalinos ostentan características químicas similares, el sodio es el único que se encuentra en cantidades significativas en las aguas naturales.

El sodio es sin duda el más abundante de los iones metálicos presentes en el agua del mar, siendo su concentración media del orden de unas 10.000 ppm. El agua subterránea de las formaciones calizas puede contener solamente unas pocas partes por millón de sodio con relación a varios cientos de partes por millón de sólidos disueltos totales.

Casi todos los compuestos de sodio son solubles, de modo que el sodio desprendido de las rocas o del suelo, permanece en solución. Esto significa, desde luego, que los compuestos de sodio no precipitan para formar costras o materiales incrustantes que puedan causar la obstrucción de los pozos. El sodio tampoco contribuye a la dureza del agua. Sin embargo, las aguas subterráneas que contienen considerables cantidades de carbonato de sodio o bicarbonato de sodio son alcalinas y alcanzan valores de pH de 9 o más.

Alcalinidad

La alcalinidad del agua consiste en su habilidad para neutralizar el ácido. Existe alguna confusión en el uso y la interpretación del término "alcalinidad", puesto que la presencia de éste no quiere decir necesariamente que el pH del agua deba estar por sobre el valor neutro de 7. El agua subterránea con un valor del pH por debajo de 7, puede contener al mismo tiempo algunas sales que neutralizarían el ácido y por lo tanto alguna alcalinidad medible.

Los iones de carbonato y de bicarbonato presentes en el agua contribuyen a la alcalinidad. Los iones de cloruro, sulfato y nitrato, no lo hacen.

Si se halla presente, el hidróxido, o iones de OH afectan la alcalinidad, pero solamente muy pocas aguas subterráneas contienen suficiente hidróxido de alguna significación. El hidróxido puede encontrarse en agua tratada o en la que ha estado en contacto con concreto.

La alcalinidad se determina agregando el agua una solución ácida estándar y midiendo el tiempo requerido para cambiar de color, por dos diferentes indicadores químicos. La fenolftaleína y el anaranjado de metilo son los indicadores que se emplean en la determinación de la alcalinidad.

Acidez

La acidez es la propiedad opuesta a la alcalinidad y consiste en la habilidad del agua para neutralizer una base o un álcali agregado a ésta. Afortunadamente, en la mayoría de los lugares no es muy común la presencia de ácidos minerales libres en el agua subterránea. Las aguas de las minas, especialmente en áreas de explotación carbonífera, constituyen ejemplos comunes. El ácido es por lo general sulfúrico, proveniente de los cambios químicos sufridos por la pirita de hierro u otros sulfuros metálicos. El agua y el oxígeno se combinan con el sulfuro para formar ácido sulfúrico.

Aunque cualquier agua con un valor de su pH por debajo de 7 se denomina agua del tipo ácido, la acidez mineral libre se hace presente únicamente cuando el pH se halla por debajo de 4.5. La acidez total se expresa generalmente en términos de una cantidad equivalente de ácido sulfúrico.

Cloruro

El cloruro se manifiesta abundantemente en el agua de mar, en donde constituye el ión negativo predominante. El contenido de cloruro del agua de mar es de alrededor de 19.000 ppm. Las rocas ígneas son por lo general de bajo contenido de cloruro. La verdaderamente gran cantidad de cloruro del agua de mar, ha sido motivo de mucha discusión entre los geoquímicos. Resulta difícil explicar el origen de esta gran cantidad de cloruro en el agua de mar. Sin embargo, se ha llegado a la conclusión de que debe haber existido una fuente mayor de cloruro, puesto que no se puede explicar la cantidad presente en las aguas del mar con base en la que ha sido liberada a través de los tiempos por la meteorización de las rocas ígneas. Algunos autores piensan que el exceso debe haber provenido en forma de ácido clorhídrico, o como sales volátiles de cloruro, producto de erupciones volcánicas, flujo de geiseres, o de fuentes termales, o de aguas juveniles o magmáticas.

En los Estados Unidos, el agua de lluvia contiene menos de 1 ppm como promedio de cloruro. Sin embargo, en Nueva Inglaterra se han reportado en algunos lugares, valores tan altos como 6 ppm, lo que podría ser el resultado de contaminación del aire por cloruro arrastrado tierra adentro desde el océano.

A menos de que los acuíferos hayan sido contaminados con agua de mar, el contenido de cloruro de las aguas subterráneas de las

regiones húmedas es bajo, no excediendo por lo general de 5 ppm. Cuando se bombean intensamente pozos que se hallen cerca de la costa o a lo largo de ríos salobres, algo del agua salada podría desplazarse hacia el agua dulce del acuífero. Si se lleva un registro del contenido de cloruro de muestras de agua obtenidas de pozos de observación, se tendrá la información necesaria para saber si se está manifestando la contaminación del acuífero.

Para la mayoría de los propósitos, el agua que contiene menos de 150 ppm de cloruro resulta adecuada. Un contenido de cloruro mayor de 250 ppm ya es inconveniente cuando se trata de abastecimientos municipales de agua. Cuando el contenido es de más de 350 ppm, resulta también inconveniente para la mayoría de los fines industriales o de riego. Cuando el agua contiene tanto como 500 ppm de cloruro tiene por lo general un sabor desagradable. Sin embargo, los animales pueden beber agua cuyo contenido de cloruro es mucho mayor que éste. Algunas autoridades sugieren que el ganado puede consumir satisfactoriamente agua que contenga tanto cloruro como 3.000 ó 4.000 ppm.

Fluoruro

En el agua subterránea, el fluoruro está presente solamente en pequeñas concentraciones. Este se deriva de la fluorita, el principal mineral de fluoruro de las rocas ígneas, o de algún otro de los innumerables y complejos minerales portadores de fluoruro. Los gases provenientes de volcanes o fumarolas pueden también contener fluoruro, y en algunos lugares, estos pueden ser la fuente de fluoruro en el agua. Resulta muy importante conocer la cantidad de fluoruro contenida en el agua usada por los niños. Se ha demostrado que un alto contenido de fluoruro en el agua guarda una estrecha relación con el defecto dental conocido como "esmalte manchado" o fluorosis dental. Este puede aparecer en los dientes de los niños que beben agua con alto contenido de fluoruro durante el período en que se forma la dentadura permanente.

En contraposición a este efecto sobre los dientes de los niños, los estudios recientes han demostrado que cuando las concentraciones de fluoruro se hallan por debajo de aquéllas que producen las inconvenientes manchas en el esmalte de los dientes, éstas resultan beneficiosas y ayudan a prevenir las caries dentales. La concentración óptima de fluoruro pareciera ser de alrededor de 1,00 ppm. En el amplio informe de la Comisión de Control de Contaminación del Estado de California, referente a los estándares de calidad de agua, se establece que el agua que contenga menos de 0.9 a 1.00 ppm de fluoruro rara vez causa las manchas del esmalte de los dientes de los niños. En los adultos, las concentraciones menores de 3 a 4 ppm tampoco producirán fluorosis acumulativa endémica ni efectos sobre el esqueleto.

Los estándares de calidad de agua establecidos por el Servicio de Salud Pública en 1962, especifican el límite superior de la concentración permisible de fluoruro como de 2.4 ppm para aquellas áreas en donde el promedio anual de la máxima temperatura diaria del aire se halla en el rango de 10 a 12°-C. Los límites más bajos aplicables a temperaturas más altas del aire, están encaminados a compensar la mayor ingestión de agua por parte de los niños y tratan de mantener la cantidad de fluoruro dentro de los límites permisibles.

Nitrato

La variación del contenido de nitrato en diferentes aguas es grande, y en muchas aguas subterráneas no parece guardar relación con ninguna formación geológica. El contenido de nitrato del suelo, sin embargo, ha provenido de varias fuentes.

Algunas plantas como la alfalfa, toman el nitrógeno del aire y lo fijan en el suelo en forma de nitrato.

El nitrógeno presente en los desechos vegetales y desperdicios animales como también en los fertilizantes a base de nitrógeno, penetra también al suelo. Algunas cantidades adicionales provienen también de la descarga de aguas negras. Las altas concentraciones de nitrato en las aguas de los pozos, pueden deberse a un escurrimiento directo de agua superficial dentro de éstos, o a percolación de agua contaminada dentro del acuífero y desde el suelo sobreyaciente. El estiércol contiene grandes cantidades de nitrógeno orgánico. Puesto que las letrinas, los pozos negros y los establos son fuentes de nitrógeno orgánico, un alto contenido de nitrato en el agua de un pozo indicaría una contaminacion provocada por los agentes anteriores. Un alto contenido de nitrato puede considerarse como un índice y una advertencia de que el agua debe examinarse para determinar la presencia de bacterias patógenas que también podrían ser arrastradas hasta el acuífero desde esos focos de contaminación.

El nitrato es un ión cargado negativamente, que consiste de una combinación de nitrógeno y oxígeno en la proporción de 1 átomo de nitrógeno por 3 átomos de oxígeno. Su símbolo químico es NO_3. En los análisis de agua, se reporta ya sea en términos del ión nitrato o en términos del elemento nitrógeno. Una parte de nitrógeno es igual a 4.5 partes de nitrato.

Cuando el nitrato se halla en concentraciones mayores que 45 ppm, el agua es indeseable para fines domésticos, debido al posible efecto tóxico que puede tener sobre los niños. Este efecto se conoce como cianosis. La cianosis hace que el niño se vuelva apático y soñoliento y su piel toma un color azulado. Esta condición puede provenir cuando se usa agua con excesivo nitrato para la preparación de los alimentos del niño. El nitrato en el agua de beber no causa cianosis en los adultos o en los niños mayores.

Varios departamentos estatales de salud han establecido tentativamente un límite máximo de seguridad de 45 ppm de nitrato. Este es equivalente a 10 ppm de nitrógeno elemental solo. Una agua que contenga tanto como 20 ppm de nitrógeno o 90 ppm de nitrato, se considera peligrosa para los niños pequeños. Debe hacerse notar que el nitrato no se puede eliminar mediante ebullición del agua. La única forma de removerlo es mediante la desmineralización del agua o destilando ésta.

Como el nitrato puede derivarse de desechos de agua negra, su presencia en el agua se considera una evidencia de contaminación. Sin embargo, debe mencionarse que tal contaminación puede agregar al agua subterránea no sólo nitrato, sino también cloruro. Un alto contenido de nitrato conjuntamente con un alto contenido de cloruro, resulta ser una indicación más positiva de la percolación de aguas negras o de contaminación por parte de establos, que la sola presencia de nitrato.

Sulfato

El sulfato contenido en el agua subterránea proviene principalmente del yeso o de la anhidrita (sulfato de calcio). Puede también derivarse de la oxidación de la pirita que es un sulfuro de hierro. El sulfato de magnesio (sal de Epsom), y el sulfato de sodio (sal de Glauber) si se hallan presentes en suficiente cantidad, le impartirán un sabor amargo el agua y ésta puede tener un efecto laxante en las personas que no estén acostumbradas a beberla.

Gases Disueltos

En los análisis rutinarios de agua, los gases disueltos por lo general no se determinan. Sin embargo, cuando se hallan presentes en cantidades sustanciales, pueden ser importantes en la utilización del agua para ciertos propósitos. Los gases disueltos más comunes incluyen el oxígeno, el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de carbono, el nitrógeno, el dióxido de azufre y el amoniaco. De todos éstos, los primeros tres son los de mayor significación desde el punto de vista del agua subterránea y su desarrollo.

Como la solubilidad de un gas varía inversamente con la temperatura y aumenta con la presión, los gases disueltos se ven involucrados en problemas de corrosión del ademe y rejillas de pozos, y también en la deposición de materiales incrustantes.

Oxígeno disuelto — El contenido de oxígeno disuelto del agua subterránea que se encuentra a profundidades apreciables por debajo de la superficie del terreno, es por lo general muy bajo. Se presume que la mayor parte del aire disuelto contenido en el agua que percola a través del suelo, se utiliza en la oxidación de la materia orgánica conforme el agua se desplaza a través de la zona de aereación. Sin embargo, pareciera que algo de oxígeno disuelto puede hallarse presente a profundidades de 30 metros o mayores.

La solubilidad del aire en agua que se halle a 0°-C y a presión atmosférica, es de alrededor de 29 ppm, de las cuales aproximadamente 10 ppm representan la fracción de oxígeno. La solubilidad del aire en el agua disminuye a temperaturas altas y se vuelve cero en el punto de ebullición.

El agua contenida en un tanque hidroneumático puede tener mucho más aire disuelto que la cifra anterior, puesto que la cantidad de cualquier gas que entra en solución a una temperatura dada, aumenta con la presión.

El oxígeno disuelto acelera el ataque corrosivo del agua sobre el hierro, acero, hierro galvanizado y bronce. Si la temperatura aumenta, la velocidad de corrosión tiende a aumentar, pero al mismo tiempo el oxigeno en solución disminuye a mayor temperatura, lo que aminora el efecto anterior, a menos que el agua calentada se halle a presión.

Cuando el pH es bajo, los metales son corroídos más rápidamente por el agua que contenga oxígeno disuelto. Los valores altos de pH tienden a retardar el ataque. Sin embargo, una agua que tenga una conductividad eléctrica relativamente alta, y que a su vez contenga oxígeno disuelto, será agresiva aunque su pH sea de 8 o más.

El oxígeno disuelto puede hacer que el agua ataque al hierro galvanizado y ciertas clases de latón, tan rápido como al hierro negro. El zinc del galvanizado es oxidado, removido y eliminado mucho más rápidamente de lo que lo haría una agua libre de oxígeno. El oxígeno disuelto también remueve el zinc de las aleaciones de bronce, debilitando el metal y dejándolo poroso. El bronce rojo resiste mejor este tipo de ataque, que el amarillo.

Sulfuro de Hidrógeno. El agua subterránea que contiene sulfuro de hidrógeno gaseoso en solución, se reconoce por su olor a "huevos podridos". Puede sentirse el olor de una pequeña cantidad tal como 0.5 ppm en agua fría y cuando la concentración es de 1 ppm aquél resulta francamente ofensivo. Cuando el agua que contiene azufre tiene un alto valor del pH, se siente menos el olor, en cuyo caso un sulfuro alcalino, tal como el sulfuro de sodio, se halla presente en lugar del sulfuro de hidrógeno.

El sulfuro de hidrógeno presente en el agua forma un ácido débil y el agua resulta por lo general corrosiva. Cantidades apreciables de este gas atacan las aleaciones de cobre de las rejillas de pozos.

En algunas aguas subterráneas se encuentran bacterias reductoras del sulfato. Las condiciones que favorecen su desarrollo, son la ausencia de oxígeno y un sustancial contenido de sulfato. Estas bacterias cambian los sulfatos a sulfuro de hidrógeno. En un tubo de hierro el agua ataca entonces el metal para formar sulfuro de hierro, y como este compuesto es insoluble, es depositado como escamas de hierro en la tubería.

Cuando la bacteria ferrosa cambia el hierro disuelto a óxido insoluble, se forman también costras de óxido de hierro en las paredes interiores de las tuberías. El hierro disuelto puede también ser el producto de la corrosión directa de la tubería misma. La superficie corroída recibe luego la deposición o formación de costras de óxido.

Aunque estos dos efectos podrían normalmente considerarse como problemas de incrustación, la formación de los materiales incrustantes o costras, son de hecho el resultado de una acción corrosiva. En un principio el hierro es disuelto por el medio corrosivo y los productos de esta corrosión son luego redepositados en forma de costras. Estas costras ocupan un volumen mayor que el del metal original, llenando gradualmente la tubería y reduciendo su capacidad de acarrear agua. Un cierto estudio realizado, demostró que las tuberías conductoras de agua pueden perder su capacidad a razón de 1 a 2 por ciento por año, durante un período de 20 a 30 años.

Dióxido de Carbono. La lluvia puede recoger dióxido de carbono conforme pasa a través de la atmósfera en su camino hacia la superficie del terreno, pero una gran parte de aquél es disuelta por el agua que fluye sobre o a través del suelo en que crecen las plantas. Las raíces de las plantas y la vegetación en descomposición contribuyen a la formación de dióxido de carbono en el aire contenido en el suelo que se halla sobre la superficie freática. Según Thorne y Peterson,[5] en condiciones favorables se pueden producir de 0.8 a 1.5 litros por kilómetro cuadrado, de dióxido de carbono.

Cuando el calcio y el bicarbonato se hallan en solución, la presencia de dióxido de carbono en el agua subterránea es de especial significación. La solución puede ser estable en condiciones de suficiente presión, la que previene el escape del dióxido de carbono. Sin embargo, tal como se mencionó previamente, la presión de un acuífero en la vecindad de un pozo puede ser reducida por el bombeo, y el dióxido de carbono abandona la solución y se escapa en forma de burbujas de gas. Cuando el equilibrio del agua es por tal razón alterado, el carbonato de calcio puede precipitar hasta que la solución se halla nuevamente en equilibrio con el dióxido de carbono que permanece disuelto en agua a la presión atmosférica. Este proceso se mantiene constantemente en actividad durante el bombeo de aquellos pozos que rinden agua con carbonato de calcio y en presencia del dióxido de carbono.

Tabla IX

Alcalinidad de Bicarbonato ppm de $CaCO_3$	Dióxido de Carbono Libre (ppm)		
	pH = 7	pH = 7.5	pH = 8
100	22	6	2
200	43	12	4
300	63	17	6
400	82	22	7

Para retardar la deposición del carbonato de calcio mientras se bombea un pozo, las pérdidas de carga deben mantenerse en un mínimo de modo que la reducción de presión sea tan baja como lo permitan las condiciones de operación. El reducir la velocidad de entrada en las aberturas de la rejilla del pozo, ayuda mucho. La velocidad mínima de entrada se obtiene utilizando rejillas que provean la máxima área de entrada.

La interrelación del pH con el bicarbonato y con el dióxido de carbono que hemos descrito anteriormente al discutir el pH del agua, nos brinda una manera de utilizar la alcalinidad de bicarbonato y el pH, para calcular el contenido de dióxido de carbono libre de una muestra de agua. La Tabla IX nos da los valorees del dióxido de carbono libre en ppm contenidos en el agua para algunas combinaciones de las otras dos propiedades.

Las cifras mostradas en esta tabla están sujetas a pequeñas correcciones debidas a la temperatura y al contenido mineral disuelto. Sin embargo, para la mayoría de los usos, son suficientemente exactas.

Constituyentes Menores

Las aguas naturales pueden contener otros minerales que no hemos discutido previamente, pero por lo general éstos no se hallan presentes en cantidades sustanciales y son menores de 1.00 ppm. A menos que la presencia de un constituyente menor esté indicada por alguna circunstancia especial, tal como el medio geológico del agua subterránea; por un evidente cambio en el carácter del agua; por el acceso accidental de un desecho indeseable que se haya infiltrado hasta el depósito subterráneo, o porque se observe algún efecto en los cultivos, la determinación de los constituyentes menores se hace solamente en los análisis completos de agua. No obstante, en algunos casos, uno o más de estos constituyentes menores podrían estar presentes en grandes cantidades y aún ser el mayor constituyente de una agua determinada.

Entre los constituyentes menores se encuentra un elemento llamado boro, el cual se determina a menudo en los análisis de agua de regiones áridas y semi áridas, en donde éste se usa para riego. Aunque el boro es esencial para el crecimiento de las plantas cuando se halla presente únicamente en trazas, resulta muy perjudicial a éstas cuando su concentración en el agua de riego excede de 1 ppm.

Composición del Agua con Relación a su Uso

El propósito fundamental del análisis del agua es el de determinar si es adecuada para un uso dado. Los principales usos del agua son (1) doméstico; (2) agrícola; y (3) industrial. Cuando el abastecimiento es del tipo municipal, éste puede abarcar las tres clases mencionadas y en consecuencia exige que el estándar de calidad sea más alto que el que se consideraría satisfactorio para uno solo de los usos anteriores. Por otro lado, una agua que se vaya a destinar a un uso industrial particular, puede requerir una calidad que es sustancialmente mejor que la que se considera aceptable en un abastecimiento municipal.

Calidad del Agua en la Agricultura

La adaptabilidad del agua para fines de riego, depende tanto de los sólidos totales disueltos (propiedad conocida como salinidad) y del contenido de sodio en relación a las cantidades de calcio y magnesio. Cuando una agua de alto contenido de sodio se aplica al suelo, parte de ese sodio es retenido en la arcilla del suelo. La arcilla cede calcio y magnesio en intercambio con el sodio. Esta actividad se denomina intercambio básico.

El intercambio de iones altera las características físicas del suelo. La arcilla que contiene un buen exceso de iones de calcio o magnesio, se labra fácilmente y tiene buena permeabilidad. Si la misma arcilla adquiere sodio, se toma pegajosa y escurridiza cuando se humedece y tiene muy baja permeabilidad. Cuando se seca se contrae en la forma de duros terrones difíciles de romper al cultivar.

Las altas concentraciones de sales de sodio desarrollan suelos alcalinos en los cuales crece muy poca o ninguna vegetación.

Si el agua para riego contiene iones de calcio y magnesio en cantidad tal que exceda la de sodio, las partículas arcillosas del suelo retendrán una fuerte concentración de calcio o magnesio para mantener una buena labrabilidad y permeabilidad. Estas aguas son muy apropiadas para el riego, aunque su contenido mineral total sea bastante alto.

Estos hechos condujeron a la adopción, en 1948, de un factor denominado "el porcentaje de sodio", que es un índice aproximado de la adaptabilidad del agua para el riego. Este porcentaje es el cociente de los

iones de sodio sobre el total de iones de sodio, calcio y magnesio. Un porcentaje de sodio que exceda del 50 por ciento, ha sido tomado como una advertencia de que existe peligro por la presencia de sodio.

Al efectuar el cálculo, la cantidad de cada constituyente debe primero convertirse de partes por millón, a "equivalentes por millón". Los equivalentes por millón se calculan dividiendo las partes por millón por el peso químico de combinación de cada ión. Expresadas en esta forma, concentraciones iguales de diferentes iones son equivalentes a su tendencia a formar cualquier posible combinación química. Al multiplicar partes por millón por los siguientes factores de conversión se obtendrá la concentración de cada uno de los iones, en equivalentes por millón.

Ión	Factor
Calcio (Ca^{++})	0.04990
Magnesio (Mg^{++})	0.08224
Sodio (Na^{+})	0.04350

En 1954, el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos, propuso que la idea del porcentaje de sodio podría ser sustituida por un cociente o relación más significativa denominada la "relación de adsorción de sodio" o RAS. Esta relación se calcula mediante la siguiente fórmula, estando expresadas las concentraciones de los iones en equivalentes por millón.

$$SAR = \frac{Sodio^{+}}{\sqrt{\dfrac{Calcio^{++} + Magnesio^{++}}{2}}}$$

El desarrollo de un exceso de sodio en el suelo, es la consecuencia que resulta del uso de agua de riego con un valor alto de RAS. Valores de 18 o mayores, se consideran altos; relaciones de 10 a 18 son valores medios; los valores por debajo de 10 son bajos y no ofrecen el peligro de crear un problema por sodio.

Las plantas toman muy poco de los minerales disueltos en el agua de riego. La mayoría, pues, de los minerales presentes en el agua de riego, permanece en el suelo o disueltos en la parte no utilizada del agua. Si el riego repetido o frecuente da por resultado la formación de sales minerales, puede llegarse a destruir la productividad del suelo sometido a riego. Así pues, deberá desarrollarse algún medio de lixiviación para las sales acumuladas en el suelo.

Los análisis químicos de agua no indican si ésta se encuentra libre de bacterias patógenas que la hagan indeseable para propósitos de uso doméstico. La mayor parte de las aguas subterráneas, cuando tienen un contenido suficientemente bajo de minerales, lo que las hace aptas para tal uso, son potables a menos de que hayan sido contaminadas por actividades humanas. Sin embargo, debe verificarse frecuentemente su calidad sanitaria si el agua se va a utilizar sin tratamiento para asegurar así que se halle libre de bacterias patógenas.

Calidad del Agua para Uso Doméstico

Los estándares que se utilizan para juzgar la adaptabilidad del agua para uso doméstico, son los del Servicio de Salud Pública de 1962, los que constituyen una revisión de los emitidos en 1946. Estos estándares son legalmente aplicables a los transportes inter-estatales, puesto que el agua potable que éstos usan deben cumplir con los requisitos establecidos. En 1946, la American Water Works Association adoptó una resolución que recomendaba el que los estándares fueran cumplidos por todas las agencias que manejan sistemas de abastecimiento público de agua. La mayoría de los departamentos de salud, y prácticamente todos los sistemas municipales de abastecimiento de agua, cumplen con los estándares de agua potable.

Los estándares especifican requisitos generales relativos a la adaptabilidad y

protección de la fuente de suministro. La calidad bacteriológica del abastecimiento se determina mediante el examen de muestras de agua para comprobar la presencia de organismos del grupo coliforme. Aún más, para ajustarse al estándar, el agua deberá estar libre de impurezas que la pudieran hacer ofensiva a los sentidos de la vista, el gusto o el olfato.

Como no sea el escoger el sitio más favorable para impedir el acceso de contaminación superficial, el contratista de perforación de pozos no puede decidir sobre la pureza bacteriológica de la fuente que él va a desarrollar mediante la construcción de un pozo. Este puede construir el pozo de manera tal que su estructura física, tanto por encima como por debajo del terreno, proteja la calidad original del agua contenida en el acuífero. Tal como se indicó con anterioridad, la calidad bacteriológica del agua subterránea es de esperarse que normalmente sea satisfactoria, pero las pruebas que confirmen lo anterior, no se harán sino hasta que el pozo esté terminado y esterilizado. Las pruebas de aceptabilidad son por lo general hechas por las autoridades de salud o por laboratorios reconocidos.

En la Tabla X se dan los límites sugeridos de concentración para las sustancias químicas descritas en los estándares de agua potable.

Los estándares de agua potable también especifican la cantidad de ciertas sustancias, que de ser excedidas, servirá como base para rechazar el suministro. Estas se detallan en la Tabla Xa.

Las características químicas del agua son de especial interés para el contratista de perforación de pozos, puesto que la utilidad del abastecimiento depende frecuentemente del contenido mineral del agua. El contratista, por lo tanto, deberá comprender algo de la significación que tienen los límites impuestos a las sustancias químicas que se especifican en los estándares de agua potable. En muchos casos, un pozo interceptará más de una formación acuífera y la composición de las respectivas aguas podrá variar ampliamente. En tales circunstancias, es conveniente excluir aquellas aguas de calidad pobre, del resto. De acuerdo con lo anterior, el contratista deberá esbozar el programa de perforación de tal modo que haga posible desarrollar solamente las aguas de mejor calidad.

Tabla X

Sustancia	Concentración en mg/litro
Alkyl Benceno — Sulfato (ABS)	0.5
Arsénico (As)	0.01
Cloruro (Cl)	250.00
Cobre (Cu)	1
Extracto Clorofórmico en Carbón	0.2
Cianuro (Cn)	0.01
Fluoruro (F) (el contenido aumenta con la temperatura)	Ver Pág. 22 y 23 de la traducción de este capítulo.
Hierro (fe)	0.3
Manganeso (Mn)	0.05
Nitrato (NO_3)	45
Fenoles	0.001
Sulfato (SO_4)	350
Sólidos disueltos totales	500
Zinc (Zn)	5

Tabla Xa

Sustancia	Concentración en mg/litro
Arsénico (As)	0.05
Bario (Ba)	1.0
Cadmio (Cd)	0.01
Cromo (Hexavalente) (Cr^{6+})	0.05
Cianuro (Cn)	0.2
Fluoruro (F)	Ver Pág 22 y de la traducción de este capítulo.
Plomo (Pb)	0.05
Selenio (Se)	0.01
Plata (Ag)	0.05

Referencias

1. HEM, John D. "Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water." Water Supply Paper 1473 (1959) pp 254, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
2. "Standard Methods for Examination of Water and Sewage." (1955) APHA. AWWA. FSIWA. American Water Works Association, New York, N.Y
3. "Manual on Industrial Water." (1954) American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pa.
4. "Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils." Handbook 60, (1954), p 80, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D. C.
5. THORNE, D. W. and PETERSON, H. B., "Irrigation Soils. Their Fertility and Management" (1954) The Blakiston Co., In., New York.
6. RAINWATER, F. H. and THATCHER, L. L., "Methods for Collection and Analysis of Water Samples." Water Supply Paper 1454 (1960), pp 297, U.S. Geological Survey, Washington, D. C.

Capitulo 5

Prueba de Pozos de Agua Para Determinar Abatimiento y Rendimiento

EN LA MAYORÍA de los casos, la prueba de bombeo de un pozo se efectúa simplemente para observar cómo se comporta éste. Esto es importante, especialmente cuando conjuntamente con los observaciones del caudal se toman algunas medidas del abatimiento producido. Estas dos magnitudes, rendimiento y abatimiento, tienen una aplicación directa en la selección de los elementos de un equipo permanente de bombeo que se ajuste a las características de operación del pozo. De hecho, la prueba preliminar de bombeo constituye la única base firme para la selección y compra de una bomba para pozo.

Una prueba de bombeo lo más exacta posible, realizada con anterioridad a la adquisición de la bomba, está de sobra pagada por las economías que permite al seleccionar el equipo apropiado y por la reducción que logra en los costos de energía. Muchas veces los excesivos costos de bombeo y el funcionamiento imperfecto de la bomba se achacan al pozo, cuando en realidad los errores provienen de la selección de una bomba que no se adapta a éste.

Si se ejecutan en la forma correcta, las pruebas de bombeo logran otros objectivos importantes. Planeadas en forma apropiada y realizadas cuidadosamente, las pruebas revelan hechos importantes relativos al depósito de agua subterránea que no se pueden establecer de ninguna otra manera. La utilización práctica y la aplicación de tales pruebas se han visto aumentadas por nuestro mejor conocimiento de la hidráulica de pozos conjuntamente con el desarrollo de métodos que utilizan la información brindada por las pruebas para calcular los factores principales del comportamiento de los acuíferos.

Definición de Términos

Resulta importante el entender claramente el significado de los términos comunes que se emplean en las pruebas de bombeo de los pozos de agua. Algunos de los términos que se emplearán en este capítulo, se definirán a continuación:

Nivel Estático del Agua. Este es el nivel a que el agua permanece dentro de un pozo

cuando no se está extrayendo agua del acuífero por bombeo o por descarga libre. Generalmente se expresa como la distancia desde la superficie del terreno (o desde algún punto de referencia cercano a éste) hasta el nivel del agua en el pozo. En el caso de un pozo surgente, el nivel estático se halla por encima de la superficie. Este se puede medir una vez que se impida la salida del flujo natural. El nivel estático en estos casos se denomina algunas veces carga de cierre.

Cuando se dice que el nivel estático en un pozo se halla a 15 metros, esto quiere decir que el agua descansa a 15 metros por debajo del punto de medición y sin existir bombeo. Si decimos que un pozo tiene una carga de cierre de 3 metros, en la superficie, ello implica que la presión artesiana en el pozo es tal que el agua subiría hasta 3 metros por encima del punto de referencia y dentro de un tubo que se extendiera por sobre ese punto.

Nivel de Bombeo. Este es el nivel a que se encuentra el agua dentro del pozo, conforme avanza el bombeo. En el caso de los pozos surgentes, es el nivel con el cual el agua fluye desde el pozo. El nivel de bombeo también se donomina "nivel dinámico". Aunque menos empleado, nivel dinámico del agua es la mas descriptiva de las dos definiciones.

Abatimiento. El abatimiento en un pozo significa el descenso que experimenta el nivel del agua cuando se está bombeando o cuando el pozo fluye naturalmente. El abatimiento es la diferencia, medida en metros, entre el nivel estático y el nivel dinámico. Este representa la carga, en metros de agua, que produce el flujo desde el acuífero hacia el pozo y al caudal que se está extrayendo.

Abatimiento Residual. Una vez que el bombeo se ha detenido, el nivel del agua asciende y trata de alcanazar el mismo nivel existente antes de empezar el bombeo. Durante este período de recuperación, la distancia a que el agua se halla por debajo del nivel inicial estático recibe el nombre de abatimiento residual.

Rendimiento del Pozo. El rendimiento es el volumen de agua por unidad de tiempo que el pozo está descargando ya sea por bombeo o por flujo natural. Se expresa por lo general en metros cúbicos por hora, litros por minuto, litros por segundo, metros cúbicos por minuto, etc., conforme la descarga sea menor o mayor.

Capacidad Específica. La capacidad específica de un pozo es igual a su descarga por unidad de abatimiento, la cual se expresa por lo general en metros cúbicos o litros por hora y por metro de abatimiento. Al dividir la descarga por el abatimiento, ambos medidos al mismo tiempo, se obtiene el valor de la capacidad específica. Por ejemplo, si el caudal de bombeo de un pozo es de 100 litros por segundo y el abatimiento de 10 metros, la capacidad específica del pozo resulta ser de 10 litros por segundo por metro de abatimiento en el instante en que ambas cantidades se midieron.

Los términos nivel estático, nivel dinámico, abatimiento y abatimiento residual, se aplican de igual manera tanto a las mediciones tomadas en el propio pozo de bombeo, como también en pozos vecinos utilizados como pozos de observación. Por ejemplo, si el nivel del agua en un pozo de observación situado a 25 metros del de bombeo, desciende 1.5 metros debido a los efectos de éste, decimos que este descenso en el pozo de observación es su abatimiento en el instante en que se hizo la medición.

Objetivos de las Pruebas

Un pozo de agua se prueba para lograr cualquiera de dos própósitos principales. El objetivo más usual es el de obtener información acerca del comportamiento y eficiencia del pozo mientras éste se bombea. En tal caso, el resultado se reporta en términos de la descarga, el abatimiento observado y la capacidad específica

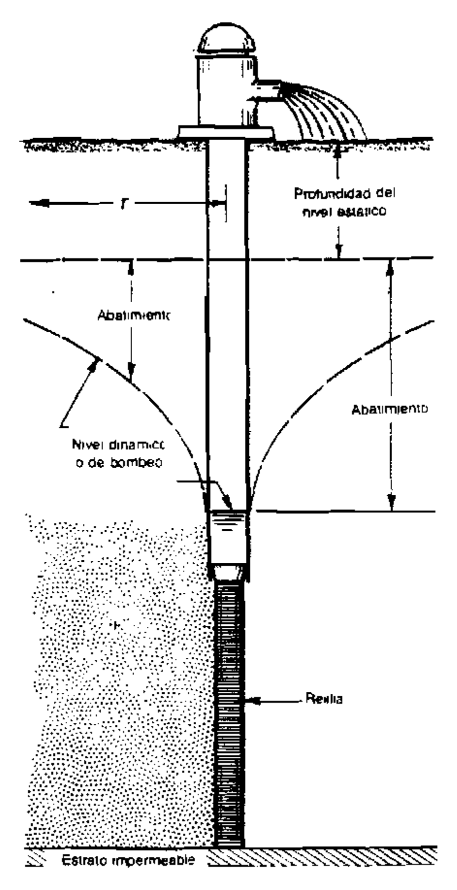


Fig. 50: Medidas relativas el comportamiento de los pozos, y a pruebas de bombeo de acuíferos y pozos.

calculada. La anterior información, analizada bajo ciertas condiciones, nos dará una medida de la capacidad productora del pozo terminado y nos permitirá tener una base para la selección del equipo de bombeo.

El otro objetivo de las pruebas, y que ha adquirido gran importancia, es el de suministrar datos de los cuales se obtienen los factores principales para calcular el comportamiento de los acuíferos. Una prueba organizada con este propósito puede denominarse, con más propiedad, una "prueba de acuífero", pues es éste o sea la formación productora, la que más que el pozo, se está probando.

En cortos términos, una prueba de acuífero consiste en bombear de un pozo y registrar tanto el abatimiento en éste, como el producido por el bombeo en otros pozos vecinos de observación. Si la prueba se ha realizado adecuadamente, los datos que se obtengan pueden analizarse para descubrir las características hidráulicas del acuífero. Conforme más personas se familiarizan con los métodos para realizarlas, vemos que las pruebas de bombeo se usan con frecuencia creciente como una de las más importantes herramientas con que se cuenta en la investigación práctica de las aguas subterráneas.

Las mediciones que deben hacerse para lograr cualquiera de los propósitos antes descritos, incluyen los niveles estáticos antes de empezar el bombeo, la razón de bombeo o descarga del pozo de bombeo, niveles de bombeo o niveles dinámicos durante varios intervalos de tiempo a lo largo de todo el período de bombeo, tiempo en que la bomba arranca, tiempo en que se haya observado cualquier cambio en la descarga, y tiempo al cual se detuvo el bombeo. Las mediciones de los niveles dinámicos después de cesar el bombeo, son también de utilidad para el estudio de la recuperación.

El procedimiento que se sigue para una prueba de acuífero es algo más complicado que el que se utiliza con el fin de determinar la capacidad de un pozo de producción ya terminado. Sin embargo, la diferencia es pequeña en cuanto a la manera en que la descarga y el abatimiento se miden y registran en ambos casos.

Los procedimientos que se discutirán en las páginas siguientes abarcan un número de detalles que se aplican con particularidad a las pruebas de acuíferos. Los métodos para determinar la descarga y el abatimiento, sin embargo, son lo mismos que deberán emplearse en cualquier prueba de bombeo, aunque el propósito principal sea solamente el de verificar el comportamiento de un pozo para un propósito u otro.

Medida de la Descarga

La verificación de la razón de descarga o caudal durante una prueba, necesita de un aditamento preciso para medir la descarga de la bomba y una manera conveniente de ajustarla para mantener ésta lo más constante posible. El mejor control se obtiene mediante una válvula instalada en la descarga de la bomba. El tamaño de la tubería de descarga y el de la válvula, deberá ser tal que esta última permanezca abierta la mitad o las tres cuartas partes, cuando se esté bombeando a la descarga deseada.

Los cambios no percibidos de velocidad que son el resultado de variaciones de voltaje en motores eléctricos, o de temperatura, humedad y mezcla del combustible en los motores de gasolina, causarán menores fluctuaciones de la descarga cuando la bomba actúa contra la presión que se desarrolla al estar la válvula parcialmente cerrada.

El tratar de regular la descarga de la bomba mediante el recurso de cambiar su velocidad, no siempre resulta satisfactorio. Esto es todavía más inconveniente cuando la bomba trabaja a descarga abierta y entrega el agua a baja presión.

Un método simple y exacto de determinar la descarga de la bomba consiste en observar el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido. Por ejemplo, si toma 25 segundos el llenar un recipiente de 200 litros, la bomba está descargando a razón de 8 litros por segundo. Este método se adapta mejor y es más práctico cuando se trata de medir caudales pequeños.

También puede utilizarse un medidor de flujo comercial para medir la cantidad bombeada en un tiempo dado. La carátula del medidor muestra el volumen total en metros cúbicos descargados a través del medidor. Al substraer dos lecturas tomadas un minuto aparte, se obtiene el caudal. Este constituye quizá el aparato más simple. La única desventaja consiste en el inevitable retraso en obtener los valores iniciales al principio de la prueba, cuando se está ajustando el caudal a la razón deseada.

El vertedero de orificio circular es el instrumento más comúnmente usado para medir la descarga de una bomba centrífuga o de turbina. Desde luego, no podría medir el flujo pulsante de una bomba de pistón. La Figura 51 muestra los detalles esenciales de la construcción y armado del aparato.

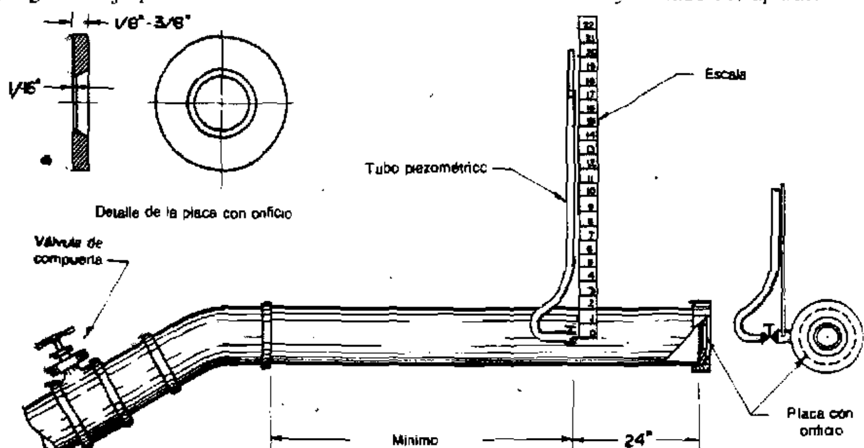


Fig. 51: Detalles esenciales del vertedero de orificio circular usado comúnmente para la medición de caudales de bombeo cuando se extrae agua por medio de una bomba turbina. La tubería de descarga debe permanecer a nivel.

El orificio consiste de una abertura perfectamente redonda situada en el centro de una placa circular de acero. El orificio debe tener bordes a escuadra definidos. La placa debe ser de un espesor de 1.6 mm. alrededor de la circunferencia de la abertura. Esta placa deberá fijarse contra el extremo exterior de una tubería de descarga a nivel, de modo que el orificio quede centrado en ésta. El extremo del tubo debe cortarse a escuadra, de modo que la placa quede en posición vertical. El interior de la tubería deberá ser liso y encontrarse libre de cualquier obstrucción que pudiera causar turbulencia anormal. La tubería de descarga debe ser recta y a nivel en una distancia de por lo menos 1.80 metros hacia atrás de la placa de orificio. De ser posible esta conducción deberá ser más larga. A 0.60 metros exactamente de la placa del orificio, deberá perforarse el tubo con un agujero de 3.2 mm. ó 6.4 mm. de diámetro, situado en un plano coincidente con el diámetro horizontal. Las rebarbas internas que resulten de esta perforación deberán eliminarse completamente.

Para medir la carga de agua o presión dentro de la tubería de descarga, se fija a este orificio un aditamento especial. Este se denomina tubo piezométrico. Consiste de un tubo plástico o de hule de 1.20 a 1.50 metros de longitud, al cual se le agrega un tubo de vidrio en el extremo exterior. El otro extremo se conecta adecuadamente mediante accesorios de plomería a la perforación efectuada en el tubo de descarga. El niple que se enrosca a la perforación hecha en el tubo, no debe proyectar hacia adentro de éste. El nivel que el agua alcanza en el tubo piezométrico representa la presión existente en el tubo de descarga cuando el agua fluye a través del orificio de salida. Este nivel puede observarse en el tubo de vidrio, sosteniéndolo verticalmente a una altura justamente encima del punto al cual rebosaría.

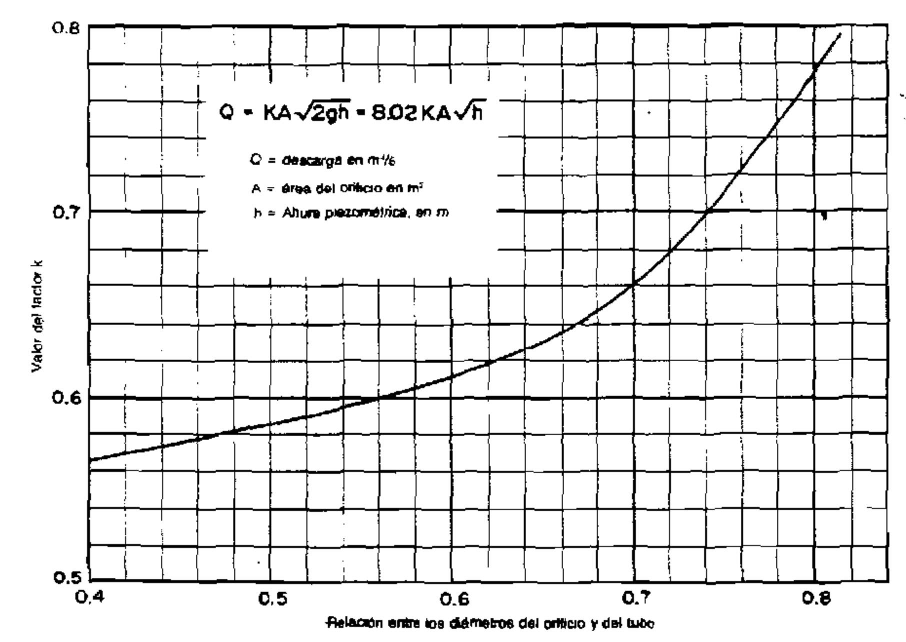


Fig. 52: Los valores del factor de descarga, K, en la fórmula del orificio circular, varían con la relación del diámetro del orificio, tal como se muestra en la figura.

Fijando a un soporte una escala graduada precisa, se puede leer la distancia en metros desde el centro de la tubería de descarga hasta el nivel que el agua alcanza en el tubo piezométrico. Esta equivale a la carga de presión sobre el orificio. Para cualquier tamaño de orificio, el flujo o caudal a través de éste varía con la carga de presión medida de la manera anterior. Se han publicado tablas estándar que dan los valores de la descarga para varias combinaciones de diámetros de orificio y tubo.

El caudal a través del orificio se calcula mediante la fórmula

$$Q = A\ V\ C$$

expresión en la cual:

Q es el flujo por unidad de tiempo
A es el área del orificio
V es la velocidad de flujo a través del orificio
C es el coeficiente de descarga para el orificio

La velocidad del agua conforme ésta pasa a través del orificio, es la velocidad en el tubo de aproximación más la velocidad adicional creada por la caída de presión entre el punto en donde se mide la carga piezométrica y el punto en donde el agua descarga por el orificio. Puesto que el chorro descarga a presión atmosférica, toda la carga indicada por el tubo piezométrico se convierte en velocidad, haciendo caso omiso de la fricción en la tubería.

De la hidráulica tenemos la relación:

$$v = \sqrt{2gh}$$

en la cual:

v es la velocidad en metros por segundo
g es la aceleración de la gravedad, en metros por segundo por segundo
h es la caída de presión en metros de agua, y que es convertida a velocidad en el sistema de flujo

Para obtener el valor correcto de V, la velocidad real a través del orificio, el valor de v dado por la relación anterior, debe sumarse a la velocidad en el tubo de aproximación y a su vez, la suma debe corregirse mediante dos factores. Una corrección es debida a la contracción del chorro que tiene lugar justamente afuera del orificio, y la otra se debe al súbito cambio de sección transversal del área de flujo y que está representado por el tamaño del orificio con relación al tamaño del tubo de aproximación.

Por conveniencia, la velocidad de aproximación y los dos factores de corrección pueden combinarse en un solo factor cuyo valor varía con la relación existente entre el diámetro del orificio y el diámetro del tubo, tal como se muestra en la curva de Fig. 52.

Combinando las relaciones anteriores y llamando K al factor de descarga, tendremos la fórmula para la descarga a través del orificio:

$$Q = K\ A\ \sqrt{2gh}$$

La raíz cuadrada de $2g$ es 9.8 metros por segundo cuadrado, de modo que la fórmula puede escribirse entonces:

$$A = 4.43\ K\ A\ \sqrt{h}$$

Los valores de K pueden obtenerse de la gráfica de Fig. 52 y la fórmula puede utilizarse para calcular la descarga con cualquier combinación de diámetro de orificio, diámetro de tubería de aproximación y altura de agua en el tubo piezométrico.

La descarga Q vendrá expresada en metros cúbicos por segundo, si la sección A, la altura piezométrica h y la aceleración de la gravedad se expresan respectivamente en metros cuadrados, metros y metros por segundo por segundo. El valor de K en la Fig. 52, es válido únicamente si se usan las unidades anteriores.

Además de construir e instalar adecuadamente el instrumento, deben tomarse dos precauciones más para asegurar que los resultados sean correctos. El diámetro del orificio debe ser menor que 0.8 del diámetro interior del tubo de

aproximación. La Fig. 52 muestra que el valor del coeficiente K en la fórmula, cambia rápidamente conforme aumenta la relación de diámetro de orificio a diámetro de tubo. Por la anterior razón, la exactitud de las mediciones se reduce conforme la relación exceda de 0.7.

El tubo piezométrico debe estar completamente libre de obstrucciones y de burbujas de aire cuando se efectúa la lectura de la carga piezométrica. Las burbujas de aire se pueden eliminar haciendo que el tubo, entre medidas, rebose agua.

Las extensas calibraciones de vertederos de orificio realizadas hace algunos años por

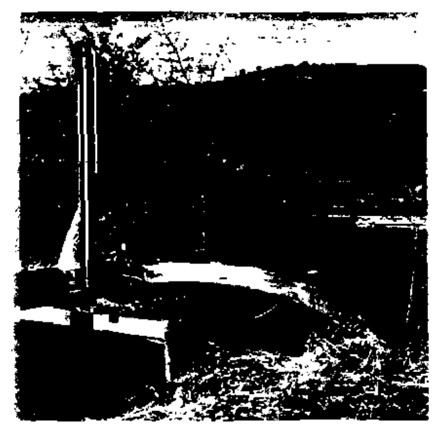


Fig. 53: Vertedero de orificio circular y tubo piezométrico correctamente instalado y utilizado durante una prueba de bombeo.
Cortesía de Pennsylvania Drilling Company

la Universidad de Purdue, demostraron que el instrumento puede medir caudales dentro de un margen de error de 2 por ciento, cuando se construye y utiliza correctamente.

Debe observarse la posición de la válvula que se usa para regular el caudal, que se muestra en la Figura 51. Si la válvula se instala algo adelante de la tubería que sirve como canal de aproximación al orificio, no existirá turbulencia que afecte el correcto funcionamiento de éste. Una buena práctica es la de instalar esta válvula a por lo menos 10 diámetros de tubo contados desde el punto en que se conecta el tubo piezométrico.

Recipiente con Orificios

El Departamento de Aguas del Estado de Illinois ha desarrollado un artefacto denominado "recipiente con orificios" para una fácil medición de descargas de hasta 35 metros cúbicos por hora. Consiste de un tanque cilíndrico pequeño con una o más aberturas circulares situadas en el fondo. El agua que se va a medir, cae dentro del tanque y descarga a través de los orificios. El recipiente se llena con agua hasta un nivel en que la carga de presión hace que la salida por los orificios sea justamente igual al caudal que llega de la bomba.

Cerca del fondo del recipiente, se instala contra la pared de éste, un tubo piezométrico. Para leer con precisión el nivel del agua dentro del recipiente, se instala en el exterior de éste, una escala graduada. El artefacto debe calibrarse y se prepara una curva de calibración que muestre la descarga a través de un solo orificio de tamaño dado, en función de varios valores de la carga de presión.

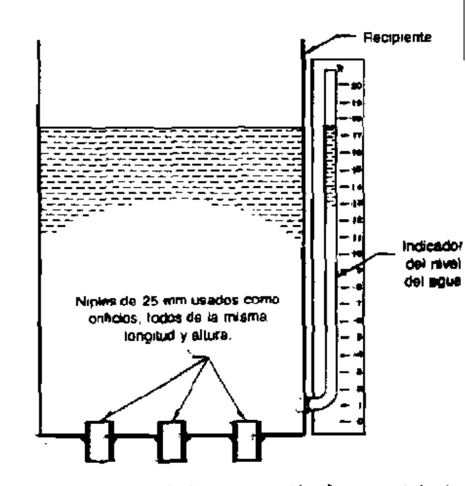


Fig. 54: Detalles de la construcción de un recipiente con orificios de aberturas múltiples. El indicador de niveles de agua muestra la carga en metros de agua durante la operación.

La razón de descarga dada por la curva se multiplica por el número de orificios que se estén utilizando y se obtiene la descarga total para un nivel dado del agua.

La Figura 55 muestra un recipiente de orificios hecho de un tambor de grasa de 50 Kilogramos, en el cual se perforaron cuidadosamente 5 agujeros de 2.54 centímetros de diámetro. En la ilustración se observan claramente el tubo y la escala que sirve para medir la altura del agua sobre los orificios.

De acuerdo con el Illinois Water Survey, un recipiente similar pero con 10 agujeros de 2.54 cm. de diámetro, funciona también satisfactoriamente. Ambos recipientes de orificio fueron cuidadosamente calibrados; los resultados demostraron que la descarga por orificio era la misma ya fuera que se usaran 5 ó 10 agujeros. Esto nos indica que



Fig. 55: Recipiente con orificios con 5 agujeros de 2.54 cm. de diámetro utilizado para medir la descarga de una bomba.

Cortesío del Illinois State Water Survey

se puede utilizar la misma curva de calibración para recipientes de múltiples orificios. Un recipiente de orificios, preparado con varios de éstos, puede utilizarse para medir un considerable rango de caudales, puesto que algunos de los agujeros pueden taponarse dejando abiertos solamente los necesarios para mantener una determinada razón de descarga.

La forma más conveniente de obtener las aberturas en el fondo del recipiente, consiste en soldar cortos niples de 2.54 cms. de diámetro a los bordes de los agujeros practicados. Cada niple deberá tener la misma longitud y el mismo diámetro interior que los otros. Los extremos de los niples deberán estar cortados a escuadra, libres de rebarbas y todos deberán encontrarse al mismo nivel, tal como se muestra en la Figura 54.

La Figura 56 nos muestra una curva de calibración típica para un solo orificio consistente de un niple de 2.54 cms. de diámetro interno y 5 cms. de largo. La curva nos muestra que cuando el agua se halla a 40 cm. en este recipiente particular, la descarga a través de un orificio es de 55 litros por minuto. Si el recipiente que se emplea, consta de 5 agujeros, la descarga para 40 cms. de presión será de 5 veces la anterior, o sea, 275 litros por minuto.

Una de las ventajas que se invocan para el recipiente con orificios se la de su practicidad para medir la descarga producida por las bombas de pistón en las cuales el caudal no es constante. El recipiente de orificios tiende a suavizar las pulsaciones del flujo y permite una buena determinación de la descarga media.

Mediciones del Nivel del Agua

Durante la ejecución de una prueba de bombeo o prueba de acuifero, debe medirse repetidas veces la profundidad al agua. Las lecturas deben efectuarse a intervalos muy cortos durante las primeras 2 horas de la prueba, aumentado el intervalo entre

mediciones conforme la prueba avanza. Las mediciones del nivel del agua deben registrarse con aproximaciones de 5 milímetros en todos los pozos de observacion. No siempre es esto posible cuando las mediciones se hacen en el propio pozo de bombeo, debido a vibraciones u otras causas provenientes de la bomba.

Las mediciones en el pozo de bombeo deben efectuarse cada ½ minuto durante los primeros 5 minutos contados a partir del inicio del bombeo; luego, cada 5 minutos durante una hora; después cada 20 minutos por alrededor de 2 horas. A partir de aquí, son suficientes las lecturas tomadas cada hora.

Las mediciones de nivel en los pozos de observación deben tomarse cada 2 minutos desde el comienzo de la prueba y por espacio de una hora. En la siguiente hora, bastará con lecturas cada 5 minutos; en las dos horas que siguen, cada 10 minutos y luego cada 20 minutos hasta concluir la prueba.

Los registradores automáticos pueden utilizarse en los pozos de observación para obtener así un registro contínuo de los cambios de nivel. Este es el mejor instrumento que puede usarse, pero necesita pozos de observación de 15 centímetros de diámetro para poderlo instalar. Además en muchos casos, no se dispone de éste.

Cuando las mediciones se hacen a mano, debe anotarse el tiempo en el instante en que se efectúan éstas. El tiempo debe anotarse con precisión de 10 segundos.

De la descripción dada antes referente a la precisión de la prueba de bombeo, se deduce que se necesitan medios exactos y rápidos de medir los niveles del agua. Los medios usuales empleados, son la sonda eléctrica, la cinta mojada y la línea de aire.

Posiblemente el mecanismo más manuable que se pueda usar en la mayoría de los casos es la sonda eléctrica, o medidor eléctrico de profundidades. Varios fabricantes lo producen. Se suspende un electrodo

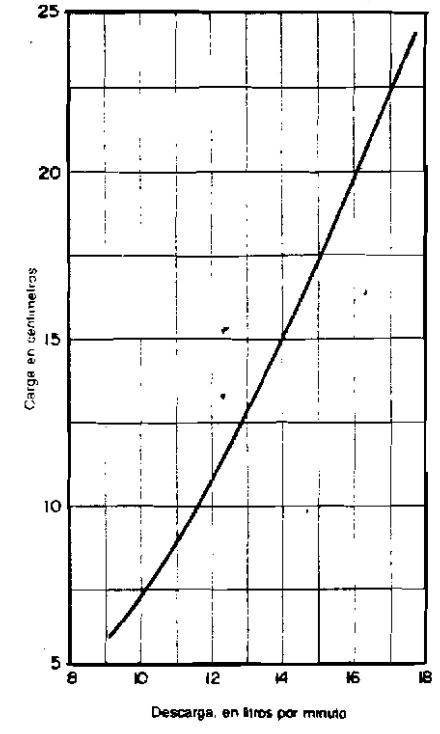


Fig. 56: Curva de calibración para cada orificio de 2.54 cm. de diámetro, en un recipiente de orificios. Los valores dados por la curva, al multiplicarse por el número de orificios en uso, darán la descarga total.

de un par de alambres aislados, y un amperímetro indica que el circuito se ha cerrado y que la corriente circula al tocar el electrodo la superficie del agua. Para obtener la corriente se utilizan baterías de linterna.

Para mejorar la exactitud de las lecturas de nivel, el electrodo y el cable se dejan suspendidos dentro del pozo durante el período de lecturas. Lo anterior elimina la posibilidad de errores provenientes de dobleces del cable, lo que alteraría su longitud ligeramente al manipularlo hacia arriba y hacia abajo. El cambio sufrido por el nivel del agua se mide con una cinta metálica colocada paralela y a lo largo del cable, usando para ello una de las marcas metálicas las cuales el fabricante adhiere al

cable a intervalos de 1.50 metros, y que sirven como referencias.

Método de la Cinta Mojada

El método de la cinta mojada es una manera muy precisa de medir la profundidad del agua y se puede usar fácilmente en profundidades que alcancen 25 ó 30 metros. Primero se adhiere una pesa de plomo a una cinta de acero para medir. Los 50 ó 60 centímetros inferiores de la cinta se recubren con tiza o yeso antes de efectuar las mediciones. Se hace descender la cinta dentro del pozo hasta que una parte de la sección entizada penetre dentro del agua, y la marca más próxima de la cinta se sostiene contra el borde superior del ademe del pozo o contra algún otro punto de referencia desde el cual se estén efectuando las mediciones. Luego se extrae la cinta. La porción mojada de la cinta puede leerse con precisión de hasta una fracción de centímetro en la parte entizada. La lectura anterior se resta de la marca que se sostuvo contra el punto de referencia, y la diferencia será la profundidad del nivel del agua.

Una de las desventajas de este método consiste en que debe conocerse aproximadamente la profundidad del agua para poder introducir una parte de la sección entizada de la cinta y que se manifieste una línea mojada. Cuando la profundidad del agua se halla a más de 25 ó 30 metros, este método resulta difícil de aplicar. Su exactitud, sin embargo, es superior a la de otros sistemas de medición.

Método de la Línea de Aire

La Fig. 58 muestra la instalación de una línea de aire dentro de un pozo con el propósito de medir la profundidad del agua. La línea de aire consiste de un conducto o tubería de pequeño diámetro y de longitud suficiente como para que se extienda desde la boca del pozo hasta unos cuantos metros por debajo del nivel a que se supone llegará el agua durante el bombeo. Conforme más bajo se instale dentro del pozo, con mayor exactitud deberá medirse la longitud de la línea de aire. Si se usa un tubo flexible,

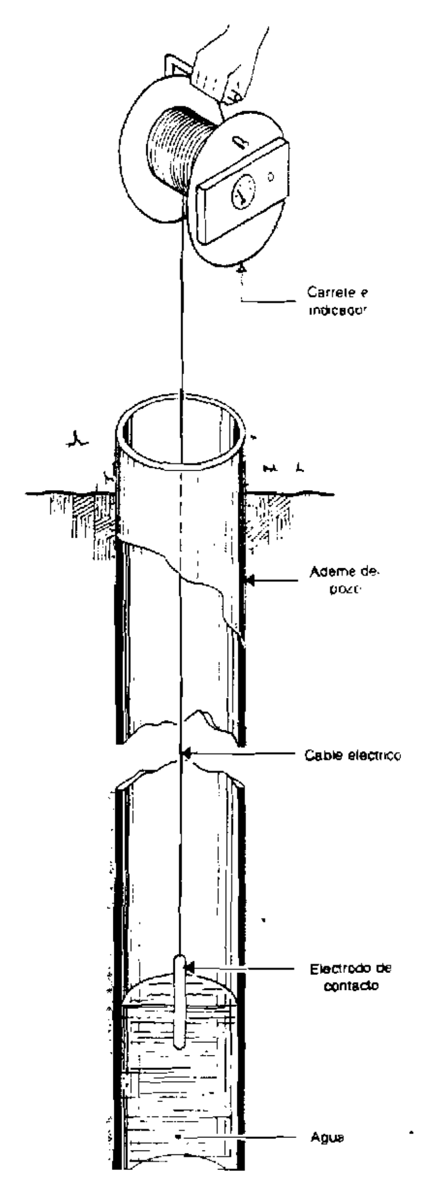


Fig. 57: Sonda eléctrica para medir la profundidad del agua, que consiste en un electrodo, un cable de dos hilos y un amperímetro que indica cuando se cierra el circuito y que el electrodo ha tocado el agua.

deberá tenerse cuidado de que éste permanezca verticalmente dentro del pozo y que no tome una forma espiral alrededor del ademe de éste. El tubo deberá ser completamente hermético para que no entre el aire a través de ninguna parte de su longitud y de igual forma deberán ser sus conexiones al nivel de la superficie del terreno.

Por lo general, se utilizan tubos de latón o de cobre de ¼ de pulgada de diámetro, para obtener una línea de aire. El extremo superior del tubo se acondiciona con una válvula y conexiones apropiadas, de manera que se pueda usar un inflador de neumáticos para introducir aire en la línea. Asimismo, se instala una te en ésta, a la cual puede conectarse un manómetro y poder medir la presión del aire que se halla dentro del tubo. Un manómetro graduado en metros de agua resulta más apropiado que los que vienen calibrados en kilogramos por centímetro cuadrado.

El artefacto funciona basado en el principio de que la presión de aire requerida para expulsar el agua contenida en la porción sumergida de la línea, es igual al peso de una columna de agua de la misma altura. Si esta presión se expresa en metros de agua, se puede calcular entonces la profundidad del agua en el pozo.

El primer paso necesario consiste en la determinación exacta de la profundidad que existe desde la boca del ademe del pozo, o desde algún otro punto de referencia, hasta el extremo inferior de la línea de aire. Una vez que se haya instalado y conectado el manómetro, se inyecta aire dentro de la línea. La presión indicada por el manómetro aumentará hasta alcanzar un valor máximo, lo que significa que toda el agua ha sido expulsada de la línea de aire. En este instante, la presión de aire dentro del tubo estará balanceando justamente la presión del agua y la lectura del manómetro indicará la presión necesaria para soportar una columna de agua de una altura igual a la distancia que media entre el nivel del agua en el pozo y el fondo del tubo. Si el manómetro indica metros de agua, mostrará directamente la longitud de la porción sumergida de la línea, en metros.

Sustrayendo la longitud sumergida de la longitud total de la línea de aire, se obtendrá la profundidad del agua desde el punto de medición o referencia escogido. La medición que se haga antes de arrancar la bomba, indicará el nivel estático del agua.

Cualquier cambio en el nivel del agua vendrá dado por la diferencia de presión

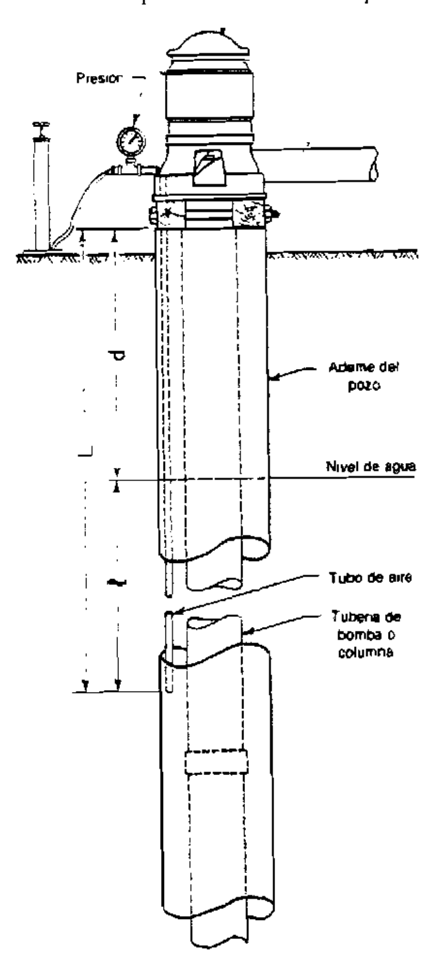


Fig. 58: Instalación típica para la medición de los niveles de agua por el método de la línea de aire.

indicada por el manómetro en dos mediciones consecutivas. El abatimiento durante el bombeo, y también durante la recuperación que se produce después de interrumpido aquél, se puede obtener fácilmente de las lecturas de presión.

Con referencia a la Fig. 58, la profundidad del agua se calcula siempre mediante la expresión:

$$d = L - l$$

en la cual:

- d es la profundidad del agua en metros.
- L es la profundiad del extremo inferior de la línea de aire, en metros.
- l es la carga de presión, en metros, representada por una columna de agua cuya altura sea igual a la longitud de la porción sumergida de la línea de aire.

Supongamos que tenemos una instalación en donde la distancia desde la boca del ademe del pozo al extremo inferior de la línea de aire es de 30 metros. Conforme se va inyectando aire lentamente en la línea, se observa que la máxima lectura en el manómetro es de 15 metros. La profundidad del nivel del agua será entonces igual a la diferencia entre 30 y 15, o sea, 15 metros. Digamos que ésta corresponde al nivel estático del agua.

Supongamos ahora que la bomba empieza a funcionar. Conforme el nivel del agua dentro del pozo desciende, la longitud sumergida de la línea disminuye, y la presión en el manómetro, también baja. Si tenemos una lectura del manómetro de, digamos 11 metros, ello quiere decir que la longitud sumergida de la línea de aire ha disminuído en 4 metros y que la profundidad del agua ha descendido desde 15 metros a 19 metros. Esto representa un abatimiento dentro del pozo, de 4 metros por debajo del nivel estático. Si el manómetro es fabricado para lecturas en libras por pulgada cuadrada (caso de los fabricados en los Estados Unidos) cada lectura deberá multiplicarse por 0.704 para convertirla a metros de agua. Una lectura de por ejemplo, 15 libras por pulgada cuadrada, corresponderá a una carga de presión de 10.56 metros.

La confianza en las mediciones efectuadas con la línea de aire, depende de la precisión del manómetro y del cuidado puesto al operar el inflador para obtener la lectura. La profundidad se determina por lo general con una precisión de unos 6 centímetros del valor real. La línea de aire no es suficientemente exacta para efectuar mediciones en los pozos de observación durante una prueba de acuíferos, pero constituye el método más práctico para realizar éstas en el pozo de bombeo. Con el objeto de evitar turbulencias cerca de la entrada de la bomba, el extremo inferior de la línea de aire deberá introducirse hasta más o menos 1.5 metros por debajo del punto en que el agua hace su entrada a la bomba.

Requisitos para la Prueba de Acuíferos

Los preparativos de una prueba de acuífero deberán permitir que se realicen las siguientes regulaciones y mediciones:

1. Caudal constante de bombeo, aunque el nivel dinámico varíe durante el período de la prueba.
2. Precisión en las mediciones del abatimiento tanto en el pozo de bombeo como en uno o varios pozos de observación situados en las cercanías de aquél.
3. Registro preciso del tiempo a que tienen lugar las mediciones que se tomen conforme avanza el bombeo.
4. Mediciones precisas de los niveles de recuperación en cada pozo conforme avanza el tiempo después de suspendido el bombeo.
5. Mantener una razón constante de bombeo en pozos vecinos, si no es posible interrumpir su funcionamiento durante el período de la prueba.

El propósito es el de obtener información de campo que permita un estudio de las relaciones tiempo — abatimiento y distancia — abatimiento durante el período de bombeo y del de recuperación una vez que se haya interrumpido aquél.



Fig. 59: Midiendo nivel de agua en pozos de observación con el método de la cinta mojada.

Utilización de los Datos Obtenidos en la Prueba

C. V. Theis, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, explicó cuidadosamente en dos trabajos publicados en 1935 y en 1938, la manera en que el tiempo, la distancia y el abatimiento que tienen lugar en un acuífero idealizado, se relacionan matemáticamente cuando se bombea agua de un pozo a razón constante. Desde entonces, sus conceptos de la hidráulica de aguas subterráneas se han utilizado ampliamente. Las mediciones que se toman durante una prueba de acuífero suministran valores que pueden introducirse en la ecuación de Theis, lo que permite el cálculo de la permeabilidad media del acuífero.

Los resultados obtenidos de este modo resultan más exactos que las pruebas de permeabilidad de laboratario realizadas en muestras de arena obtenidas de agujeros de prueba, puesto que éstas no son totalmente representativas de la formación natural. La prueba de acuífero realizada en sitio, revela el comportamiento del acuífero en su estado natural.

A más de permitir la determinación de la permeabilidad, la información brindada por la prueba puede utilizarse para determinar el coeficiente de almacenamiento del acuífero y la interferencia que podría tener lugar entre pozos situados a varias separaciones y a razones de bombeo diferentes a la empleada en la prueba. Bajo ciertas condiciones, los datos obtenidos permitirán estimar el abatimiento que es de esperarse después de un bombeo a largo plazo, y conocer la existencia de barreras impermeables que limitan la extensión del acuífero y la presencia de fuentes de recarga que de otra manera no serían identificables. (Véase el Capítulo 6).

El diámetro del pozo de bombeo debe ser lo suficientemente grande para poder acomodar la bomba de prueba y dejar un espacio que permita medir el nivel del agua. Tanto la sonda eléctrica como la línea de aire, son implementos que resultan de uso más práctico en el pozo de bombeo. La bomba de prueba deberá de estar en capacidad de erogar en forma contínua de un cuarto a un medio del rendimiento máximo del pozo.

La longitud de la rejilla dentro del pozo de bombeo, comparada con el espesor saturado del acuífero, es un factor importante. En estratos relativamente delgados, la longitud de rejilla deberá ser de por lo menos tres cuartas partes del espesor del acuífero o aún más. En los acuíferos más gruesos, la rejilla deberá ser tan larga como sea posible, y deberá enfrentarse al intervalo más permeable de la grava o de la arena. Una adecuada longitud de rejilla es más importante que el diámetro de ésta, cuando se trata de satisfacer los requisitos de pruebas como las descritas aquí.

Pozos de Observación

Los pozos de observación deben ser suficientemente amplios como para permitir mediciones rápidas y precisas del nivel de agua. Los pozos pequeños son mejores, puesto que el volumen de agua contenido en un pozo de gran diámetro puede dar lugar a que los cambios de abatimiento sufran algún retardo. Si se usa un registrador automático de niveles, el ademe del pozo deberá tener un diámetro no menor de 15 centímetros. Los pozos de observación de 5 centímetros de diámetro, resultan ideales cuando se emplean métodos manuales para medir el nivel.

Los pozos de observación se construyen por lo general con rejillas de 0.90 a 1.80 metros de longitud. Sería de desear rejillas más largas, pero ello no es absolutamente necesario. La profundidad apropiada de un pozo de observación es un factor muy importante y esto es especialmente cierto cuando se utiliza una rejilla corta.

Los pozos de observación deberán llevarse hasta una profundidad coincidente con la línea media de la rejilla que se instale en el pozo de bombeo. La excepción a la regla la constituyen aquellos pozos de observación que terminan en estratos situados por encima o por debajo de aquél que ha sido penetrado por el pozo de bombeo, con el objeto de verificar si existe alguna conexión hidráulica entre las formaciones.

Emplazamiento de los Pozos de Observación

Son dos los factores que exigen requisitos especiales en el emplazamiento de los pozos de observación. Primero, el acuífero presenta por lo general un cierto grado de estratificación y no es uniforme en todo su espesor. Segundo, la longitud de la rejilla en el pozo de bombeo puede que sea considerablemente menor que el espesor completamente saturado del acuífero. Ambos factores distorsionan la distribución de la carga hidráulica y del abatimiento en la vecindad del pozo de bombeo durante la prueba.

La permeabilidad vertical de una formación de arena estratificada es menor que su permeabilidad horizontal. Esto quiere decir que los cambios de presión dentro del acuífero causados por el bombeo, tienen lugar más lentamente en la dirección vertical que en la horizontal. En cualquier momento después de empezar la prueba de bombeo, el abatimiento que se observe a una cierta distancia del pozo de bombeo puede ser diferente a distintas profundidades dentro del acuífero. Estas diferencias se van haciendo menores conforme el tiempo de bombeo aumenta. Asimismo, el efecto que la estratificación ejerce sobre la distribución del abatimiento, disminuye conforme aumenta la distancia desde el pozo de bombeo.

Estas y una o dos más consideraciones influyen en la selección de las distancias a que los pozos de observación deben situarse con relación al pozo de bombeo. La distorsión de la distribución del abatimiento causada por la estratificación y por la escasa longitud de rejilla en el pozo de bombeo, se disipa a distancias considerables del pozo de bombeo, de manera pues que los pozos de observación no deben situarse muy cerca de éste. Los efectos anormales desaparecen probablemente desde el punto de vista práctico, a distancias que van desde 3 a 5 veces el espesor del acuífero.

En la mayoría de los casos, resulta mejor situar los pozos de observación a distancias de 30 a 90 metros desde el pozo de bombeo. Cuando los pozos de observación se hallan muy cerca del pozo de bombeo, las lecturas del abatimiento pueden conducir a resultados erróneos por las razones ya explicadas. El localizar los pozos muy lejos no es siempre conveniente, pues ello obliga a continuar la prueba por tiempo indefinido con el objeto de producir abatimiento de

suficiente magnitud en los puntos más distantes.

Puesto que el cono de depresión en condiciones freáticas se extiende a velocidad menor que en una formación artesiana, los pozos de observación para una prueba de un acuífero en condiciones libres deberán estar necesariamente más próximos al pozo de bombeo. En acuíferos artesianos de mucho espesor y que estén considerablemente estratificados, las distancias deberán ser mayores y los pozos de observación puede que deban situarse a 90 y hasta 210 metros o más, del pozo de bombeo, para obtener datos apropiados.

Número de Pozos de Observación

El número de pozos de observación que deben emplearse depende de la cantidad de información que se desea obtener y de la financiación disponible para realizar el programa. Los datos que se obtengan mediante la medición de los abatimientos en un solo punto fuera del pozo de bombeo, permitirán calcular la permeabilidad promedio del acuífero y la transmisividad conjunta con su coeficiente de almacenamiento. Si se emplazan dos o más pozos de observación a diferentes distancias, los datos suministrados por la prueba pueden analizarse de dos maneras, estudiando tanto la relación de tiempo — abatimiento como la de distancia — abatimiento. Usando ambos métodos de análisis, se logra una confrontación de los resultados y se asegura la confianza en las conclusiones. Siempre es mejor disponer de tantos pozos de observación como las condiciones lo permitan.

Tanto la bomba como la unidad de potencia que se utilicen en una prueba de acuífero, deberán ser capaces de operar ininterrumpidamente a caudal constante y por un período no menor de 48 horas. En aquellos casos en que los pozos de observación deban localizarse a distancias considerables del de bombeo, la bomba deberá funcionar continuamente por varios días. Es importante que el equipo se halle en buenas condiciones, ya que una interrupción durante el periodo de prueba obligará a comenzar de nuevo.

El caudal de bombeo debe medirse con precisión y verificarse periódicamente. Con el objeto de mantener la descarga constante, es posible que sea necesario efectuar ajustes de tiempo en tiempo. Para lograr esto fácilmente, la descarga debe ser regulada mediante una válvula instalada en la línea de descarga, en lugar de cambiar la velocidad de la bomba. La válvula provee un medio más efectivo de regulación.

Antes de empezar la prueba de bombeo, debe esbozarse con anterioridad un programa de las mediciones que se van a realizar del nivel del agua. No es necesario realizar las mediciones simultáneamente en todos los pozos. Los relojes que se utilicen para determinar el tiempo a que se realizan las medidas, deben estar sin embargo sincronizados de modo que el tiempo a que se realiza cada medida, pueda referirse a la hora y minutos exactos en que se inició el bombeo.

Ejemplo de una Prueba de Acuífero

La distribución de pozos para una prueba real de acuífero, ilustra algunos de los puntos que hemos discutido. En la Figura 60 se muestra un mapa rústico del área en que se realizó esta prueba. En la Figura 61 se indican las secciones generalizadas de los dos acuíferos del área y la posición de los varios pozos de observación utilizados.

En este caso, una planicie aluvial a ambos lados de una corriente superficial fue considerada como sitio apropiado para ubicar allí una planta industrial. Tal como se muestra, una galería de infiltración ha estado en funcionamiento por algún tiempo. La galería fue instalada unos pocos metros por debajo del lecho del río y en arena aluvial.

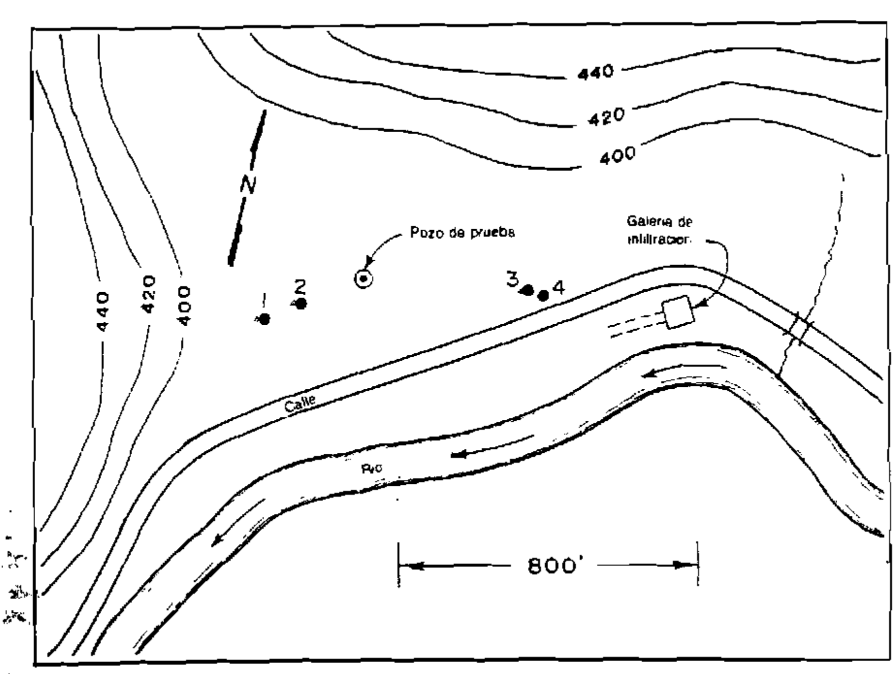


Fig. 60: Distribución de un pozo de prueba de 30 centímetros y de 4 pozos de observación para una prueba de bombeo de 72 horas. Esta prueba se realizó con el objeto de obtener suficiente información para diseñar un campo de pozos que suministrara 130 litros por segundo mediante pozos proporcionados y espaciados para lograr la máxima economía y la menor interferencia.

Para la prueba de bombeo se perforó un pozo de 30 centímentros de diámetro a aproximadamente 240 metros de la galería de infiltración. Se penetraron dos acuíferos, uno freático que se extiende hasta una profundidad de unos 14 metros; el otro, artesiano, desde 15 metros hasta los 31.5 metros. El estrato confinante que yace por encima de la arena artesiana, consistía en una capa de arcilla de 1.20 metros de espesor y que va desde 13.9 hasta 15 metros.

El nivel estático del agua en el acuífero freático se hallaba a 1.50 metros por debajo de la superficie del terreno. La presión artesiana en el acuífero inferior, era suficiente para elevar el agua en el pozo hasta un nivel estático 0.60 metros bajo la superficie.

Se decidió completar el pozo de 30 centímetros hasta una profundidad de 29 metros usando una rejilla Johnson de 6 metros de longitud con aberturas No. 25 (0.65 mm). Las aberturas de la rejilla fueron escogidas con base en el análisis de muestras de arena tomadas durante la perforación del pozo de 30 centímetros.

Se emplazaron tres pozos de observación de 5 centímetros de diámetro a distancias de 30, 60 y 120 metros del pozo de bombeo. Hubiera sido de desear, en este caso, el haber instalado otro pozo de observación de 29 metros al sur de la corriente.

Cerca del pozo de observación No. 3, se instaló un pozo somero de observación, el No. 4, para poder medir cualquier cambio de nivel que ocurriese en el acuífero superior. Esto se hizo, primero que nada, para verificar si existía alguna conexión hidráulica entre ambos acuíferos. No se conocía si la separación arcillosa era o no un estrato contínuo.

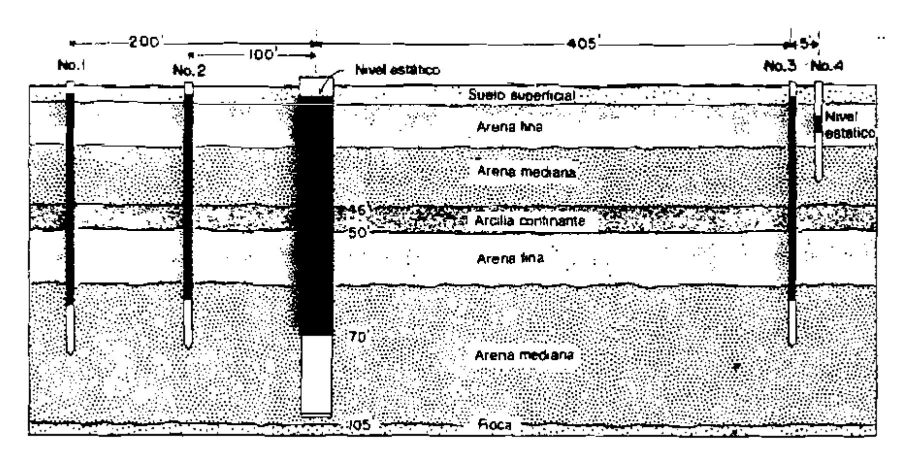


Fig. 61: Sección geológica a través de una línea que une el pozo de prueba con los pozos de observación. El estrato de arcilla separa el acuífero freático superior del artesiano inferior. La presión artesiana del acuífero inferior hace que los niveles del agua en los pozos mas profundos permanezcan alrededor de 0.90 metros por encima del nivel freático.

Cualquier cambio de nivel del agua que se manifestase en el pozo somero causado por el bombeo del pozo de prueba, indicaría la existencia de una discontinuidad en algún punto del estrato de arcilla. Se recopilaron registros del bombeo de la galería de infiltración y se compararon con las lecturas tomadas en el pozo de observación No. 4. durante la prueba.

Obsérvese que dos pozos de observación fueron localizados a aproximadamente la mitad de la distancia entre la galería de infiltración y el pozo de bombeo, aunque los pozos No. 1 y No. 2 se hallasen en el lado opuesto del pozo de bombeo. Tal distribución era importante en este caso. Si el bombeo del pozo artesiano tuviera algún efecto sobre el acuífero freático y sobre la galería de infiltración, los pozos No. 3 y No. 4, situados donde fueron emplazados, percibirían tal efecto.

Estimación del Rendimiento de un Pozo

Hay veces en que es de desear el empleo de métodos que den una medida aproximada del rendimiento de un pozo. El extraer agua de un pozo mediante la cuchara de perforación, es una manera de obtener una estimación preliminar de la productividad del pozo. Agregando agua al pozo y observando cuán rápido la absorbe éste, puede dar también una medida de su capacidad. La magnitud del chorro que fluya de una tubería, ya sea vertical u horizontal, puede también utilizarse para estimar el orden de magnitud de la descarga, cuando no se dispone de métodos más precisos.

Prueba de Cuchara

En tanto que el costo de probar aquellos pozos que van a estar en funcionamiento más o menos continuo, representa una buena inversión, no se justifica tanto en el caso de pozos pequeños. Algún otro procedimiento más sencillo resulta adecuado para aquellos pozos de uso doméstico que se van a bombear intermitentemente y a bajo caudal. La prueba de cuchara reúne los requisitos.

Cuando se extrae agua de un pozo por medio de la cuchara, deben hacerse las siguientes mediciones:

1. Nivel estático en el pozo.
2. Volumen de agua que cabe en la cuchara.
3. Número de cucharas llenas que se

extraen del pozo en un tiempo determinado.

4. Profundidad del agua mientras se opera con la cuchara.

La razón promedio a que se extrae agua con la cuchara, es igual al volumen de agua extraído del pozo, durante un cierto lapso de tiempo, dividido por el tiempo en minutos. Resulta difícil medir con exactitud el nivel del agua mientras se ejecuta la operación. La profundidad aproximada puede estimarse fijando una marca al cable de la cuchara y a una distancia conocida del fondo de ésta, y observando la posición de esta marca con relación a la boca del ademe del pozo cada vez que la cuchara toca el agua el dejarla caer dentro del pozo.

El abatimiento que se determina de esta manera, puede ser igual o no, al abatimiento que se manifestaría si se bombease el pozo al mismo caudal. Cada vez que una cuchara llena de agua es extraída del pozo, el nivel desciende, pero enseguida recupera. La recuperación del nivel del agua continúa durante el tiempo que se requiere para izar la cuchara hasta la superficie del terreno, vaciarla y volverla a introducir. El nivel está aún recuperando cuando la cuchara toca el agua en su viaje de retorno.

El que esta profundidad del agua corresponda a la que se manifestaría de bombearse el pozo a la misma razón, depende de various factores, y varía de acuerdo con las características del acuífero, el pozo mismo y la operación con la cuchara.

Sin embargo, una prueba de cuchara da una idea de la productividad del pozo. En realidad, es la única prueba necesaria en los pozos domésticos que van a ser bombeados solamente unas pocas horas al día. Para pozos mayores, la prueba de bombeo indica si el pozo merece una prueba formal: a qué profundidad habría que instalar la bomba y a qué caudal se debería bombear.

La operación con cuchara debe realizarse a razón constante. Los registros deben incluir el volumen de agua que la cuchara puede almacenar, el tiempo en que se empieza, el número de cucharas llenas que se extrae cada minuto o cada 5 minutos, y la cantidad total de cucharas llenas extraídas durante todo el período de la prueba.

Prueba Mediante la Introducción de Agua

La prueba que se realiza mediante la introducción de agua, permite estimar la capacidad de un pozo agregando agua a éste. Se realiza llenando el ademe del pozo con agua, y observando la velocidad a la cual desciende el nivel conforme el agua fluye por el fondo del pozo hacia la formación acuífera. Lo anterior es el inverso de una prueba de bombeo en cierto aspecto, en la cual se extrae agua y se mide el abatimiento que se produce.

Durante la prueba de introducir agua, el nivel de ésta se mide cada minuto o cada medio minuto después de haber llenado el ademe. Se continúa con las mediciones hasta que el nivel haya descendido varios metros.

La prueba anterior resulta de utilidad cuando la permeabilidad o la transmisividad del acuífero son bajas. Si la formación toma el agua muy fácilmente, el nivel descenderá tan rápido que las medidas no se pueden obtener.

Estimación de la Descarga en Tubos Abiertos

Las dimensiones de un chorro de agua que fluya en un tubo abierto, sea éste vertical u horizontal, pueden utilizarse para un cálculo grosso modo de la descarga.

El diámetro de la tubería y la altura a la cual se eleva el agua por encima de ésta, son los elementos que definen el flujo ascendente de un tubo vertical. F. E. Lawrence y P. L. Braunworth[4] de la Universidad de Cornell, han investigado la descarga en tubos verticales y sus resultados fueron publicados en 1906.

Estos investigadores descubrieron que

existen dos tipos de flujo que deben considerarse al estimar la descarga de tubos verticales. Cuando la altura del agua sobre el borde del extremo abierto del tubo es menor que cierto valor crítico, la descarga se asemeja a la que se produce en un vertedero. Cuando la altura de la lámina de agua sobrepasa otro valor crítico, el flujo es del tipo de descarga a chorro. Las descargas comprendidas entre estos dos valores límite, guardan una relación errática con respecto a la altura del agua.

La Figura 62 indica la manera en que debe medirse la altura de la cresta cuando prevalece el flujo a chorro. El flujo debe ser suficientemente constante de manera tal que la altura h no varíe apreciablemente. El mejor procedimiento es el de promediar varias medidas. La Tabla XI suministra las descargas para varios valores de la altura de la cresta sobre el borde del tubo. Los valores corresponden a tubería estándar de acero de los tamaños indicados y de superficie interior lisa.

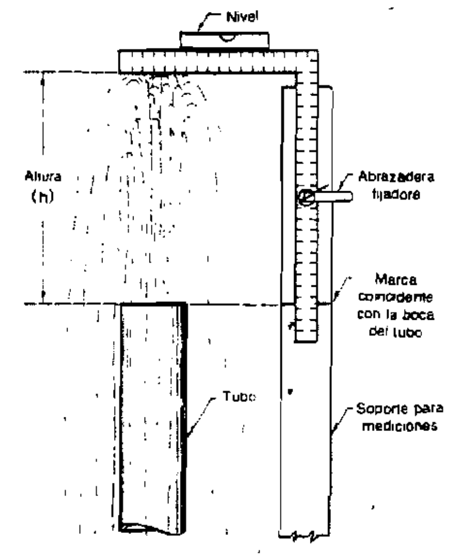


Fig. 62: Forma de medir la altura de la cresta en descarga a chorro de una tubería vertical.

Este método puede utilizarse para estimar la descarga proveniente de un pozo artesiano surgente o de un pozo bombeado en el cual el tubo de descarga pueda volverse hacia arriba. La tubería vertical debe consistir de un tramo recto, no menor de 0.90 metros de longitud, de modo que el extremo abierto se halle a esa distancia por lo menos, de cualquier codo, doblez o válvula.

Para medir aproximadamente el valor de la descarga de una tubería horizontal,

Tabla XI
Descarga en Tubos Verticales, en Metros Cúbicos por Minuto

Altura de la Cresta en mm	Diámetro Nominal del Tubo					
	2" = 50.8 mm	3" = 76,2 mm	4" = 101.6 mm	5" = 127.0 mm	6" = 152.4 mm	8" = 203,2 mm
38 (1,5")	0,083	0.163	0.257	0,322	0.416	0,606
51 (2")	0,098	0.208	0.352	0,454	0.606	0,871
76 (3")	0.125	0,280	0,492	0,700	0,926	1,457
102 (4")	0,144	0,333	0.587	0.871	1,211	1,978
127 (5")	0,167	0,375	0,662	1,022	1.438	2.385
152 (5")	0.182	0.416	0,719	1.136	1,628	2,763
203 (8")	0,212	0,473	0.852	1.363	1,930	3,407
254 (10")	0,235	0.530	0,965	1.514	2,195	3,974
305 (12")	0.261	0.606	1.060	1.665	2,422	4,353
381 (15")	0,295	0.662	1,192	1.893	2,650	4,921
457 (18")	0,322	0,738	1.325	1,908	2.952	5,299
523 (21")	0,352	0.795	1.438	2,251	3,217	5.867
609 (24")	0,379	0.879	1,514	2,422	3,482	6.245

fluyendo a sección llena y con caída libre en el extremo del tubo, se miden las distancias horizontal y vertical desde el extremo del tubo hasta un punto dado situado en el centro del chorro. La Figura 63 muestra la manera de efectuar las mediciones.

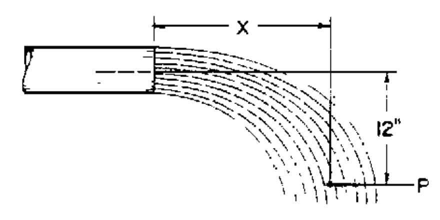


Fig. 63: La descarga de una tubería horizontal puede estimarse conociendo la distancia x.

El punto P puede localizarse si así se desea, en la superficie exterior del chorro en lugar de en el centro. En tal caso, la medida vertical deberá hacerse desde la parte superior del chorro en el extremo del tubo. Cuando el chorro se esparce, resulta más fácil localizar el centro de aquél que un punto en la superficie.

La Tabla XII da las descargas para varios tamaños de tubo estándar de acero y para diversos valores de la distancia horizontal X, estando fija la distancia vertical a 30.48 cms. La tubería de descarga debe ser recta por lo menos en una longitud de 1.50 metros, de modo que el extremo de salida se halle a esa distancia del codo, doblez o válvula más próxima.

Referencias

1. THEIS, C. V., "The Significance and Nature of the Cone of Depression in Ground-Water Bodies." Economic Geology (1938) Vol. XXXIII, No. 8, pp 889-902. Economic Geology Publishing Company, Urbana, Illinois.
2. ANDERSON, KEITH E., "Water Well Handbook." 2nd Edition (1963), pp 145-154, Missouri Water Well Drillers Association, Rolla, Missouri.
3. SLICHTER, CHARLES S., "Approximate Methods of Measuring the Yield of Flowing Wells." Water Supply Paper 110 (1904) pp 37-42, U. S. Geological Survey, Washington.
4 LAWRENCE, F. E. and BRAUNWORTH, P. L., "Fountain Flow of Water in Vertical Pipe." Transactions, (1906) Vol 57, p 264. American Society of Civil Engineers, New York.

Tabla XII
Descarga de Tubos Horizontales, Fluyendo a Sección Llena, en m³/min

Distancia X en centímetros a 30 cm. de caída	Diámetro del Tubo					
	2" = 50,8 mm	3" = 76,2 mm	4" = 161,6 mm	5" = 127 mm	6" = 152,4 mm	8" = 203.2 mm
15,2 (6")	0,079	0,174	0,303	0,473	0,684	0,806
17.8 (7")	0,091	0,191	0,352	0.553	0.799	1,378
20,3 (8")	0,106	0,231	0,401	0,632	0,916	1,585
22,9 (9")	0,117	0,261	0,450	0,712	1.030	1,772
25,4 (10")	0,132	0,291	0,503	0,787	1,143	1,968
27,9 (11")	0,159	0,318	0,553	0,867	1.256	2,165
30,5 (12")	0,144	0,348	0,602	0,926	1.370	2,308
38,1 (15")	0,198	0,435	0.753	1,185	1,715	2,952
50,8 (20")	0,265	0,583	0,803	1,578	2,368	3,936

Capitulo 6

Hidráulica de Pozos

Un pozo es una estructura hidráulica que debidamente diseñada y construída permite efectuar la extracción económica de agua de una formación acuífera. Cuán adecuadamente se logra este propósito, es algo que depende de las siguientes tres cosas:

- Una aplicación inteligente de los principios de la hidráulica en el análisis del pozo y del comportamiento del acuífero.
- La destreza al perforar y construir pozos, lo que permite tomar ventaja de la condiciones geológicas.
- Una selección tal de los materiales que asegure una larga duración a la estructura.

Tanto la persona que diseña los pozos como la que los construye, debe de conocer los fundamentos de la hidráulica de pozos. Esta puede ser complicada, y pocos ingenieros dominan todas las fases de la materia. Ciertas situaciones geológicas y condiciones del acuífero son tan complejas que las soluciones analíticas del régimen de flujo resultan imposibles.

En el Capitulo 2, se introdujo la Ley de Darcy conjuntamente con las ecuaciones fundamentales del movimiento del agua subterránea y el principio de cómo el agua almacenada en los materiales del acuífero es cedida por drenaje gravitacional. Actualmente se puede hacer aplicación de estos conceptos y de sus extensiones para resolver ciertos problemas relativos al flujo de agua hacia los pozos. Lo que aquí se va a discutir, le permitirá al ingeniero en ejercicio, o a otras personas realmente interesadas en el problema, tomar decisiones apropiadas al diseñar y construir pozos, en la mayor parte de las situaciones que se presenten.

Naturaleza del Flujo Convergente

Cuando se inicia el bombeo, el nivel del agua en la vecindad del pozo bombeado, desciende. La magnitud de este descenso del nivel del agua, se denomina *abatimiento*. La mayor cantidad de descenso o abatimiento tiene lugar en el propio pozo. El abatimiento es menor a mayores distancias desde el pozo, y existe un punto a cierta distancia de éste, en que el abatimiento es casi imperceptible. Esta distancia es variable para diferentes

pozos. También es variable para el mismo pozo, ya que depende del caudal de bombeo y del tiempo que se bombee.

El nivel del agua en el pozo de bombeo es más bajo que en cualquier otro lugar de la formación que rodea a éste, de manera que el agua se desplaza desde la formación hacia el pozo, tratando de reponer el volumen extraído por la bomba. La fuerza o presión que impulsa el agua hacia el pozo, es la carga representada por la diferencia de niveles del agua dentro del pozo y en otro punto cualquiera fuera de aquél.

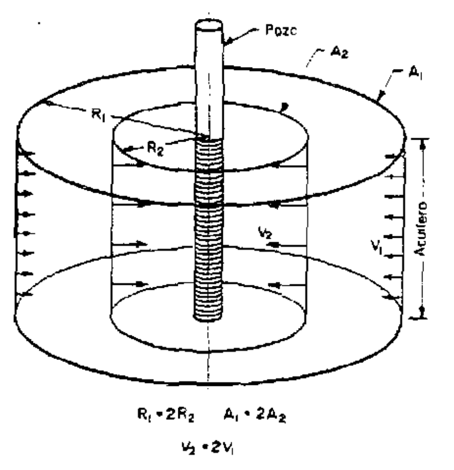


Fig. 65: El flujo converge hacia el pozo, pasando a través de superficies cilíndricas imaginarias que van siendo menores conforme se aproximan a aquél.

El agua fluye en todas direcciones desde el acuífero hacia el pozo. Conforme el agua se mueve más y más cerca de éste, lo hace pasando a través de sucesivas superficies cilíndricas que cada vez van siendo menores en área. Consecuentemente, la velocidad del agua aumenta conforme ésta se acerca al pozo. En la Fig. 65, A_1 representa el área de una superficie cilíndrica situada a 30 m. del centro del pozo, siendo A_2 el área de otra superficie similar situada a 15 m. del centro de éste. Fácilmente se ve que A_1 es el doble de A_2. Pero como la cantidad de agua que fluye hacia el pozo, a través de ambas superficies, es la misma, la velocidad V_2 debe ser el doble de V_1.

La Ley de Darcy nos indica que en el flujo a través de medios porosos el gradiente hidráulico varía directamente con la velocidad. Con velocidad creciente, el gradiente hidráulico aumenta conforme el flujo converge hacia el pozo. Como resultado de lo anterior, la superficie líquida que ha descendido desarrolla una pendiente cada vez más pronunciada hacia el pozo. La forma de esta superficie se asemeja a una depresión cónica, y de ahí que reciba el nombre de *cono de depresión*. Cualquier pozo que se someta a bombeo, queda rodeado por un cono de depresión. Estos conos difieren en tamaño y forma, dependiendo del caudal de extracción, extensión del período de bombeo, características del acuífero, inclinación de la superficie freática y recarga que tenga lugar dentro de la zona de influencia del pozo.

La Fig. 66 muestra dos conos de depresión alrededor de pozos de bombeo, ilustrando cómo la transmisividad afecta a la forma del cono. En una formación de transmisividad baja, el cono es profundo y tiene una base pequeña con lados empinados. En otra con alta transmisividad, el cono es poco profundo y presenta una extensa base y pendientes laterales moderadas. La magnitud en que el nivel original del agua o superficie de presión, desciende en cualquier punto de la base del cono y dentro del pozo mismo, se denomina abatimiento en ese punto.

La Fig. 67 muestra cómo se distribuye el abatimiento dentro del cono de depresión y a un lado del pozo de bombeo. El diagrama representa una sección del cono de depresión, tal como se vería si uno de los conos de la Fig. 66 fuera cortado verticalmente por la mitad. Sólo se muestra un lado; el otro es similar.

La curva nos indica los niveles a que se encontraría el agua en los pozos de observación que se perforaran a distancias

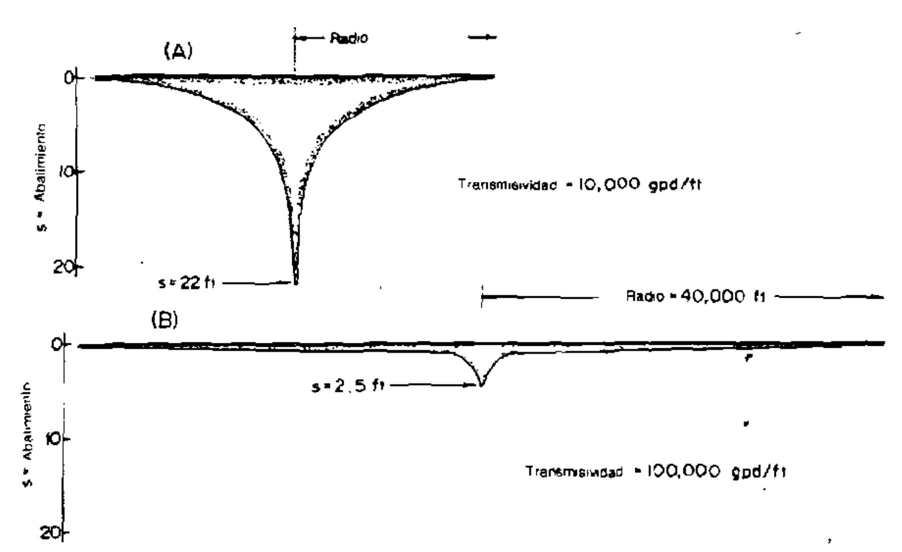


Fig. 66: El efecto que ejercen diferentes coeficientes de transmisividad en la forma, profundidad y extensión del cono de depresión, siendo en ambos casos iguales el caudal de bombeo y otros factores.

variables del pozo de bombeo. Esta curva se denomina a veces curva de abatimiento. En un acuífero freático o libre, la curva representa el nivel hasta el cual la formación se halla completamente saturada. En un acuífero artesiano, la curva representa la presión hidrostática dentro del acuífero. La diferencia entre el nivel del agua indicado por la curva y el nivel estático, constituye el abatimiento en un punto dado.

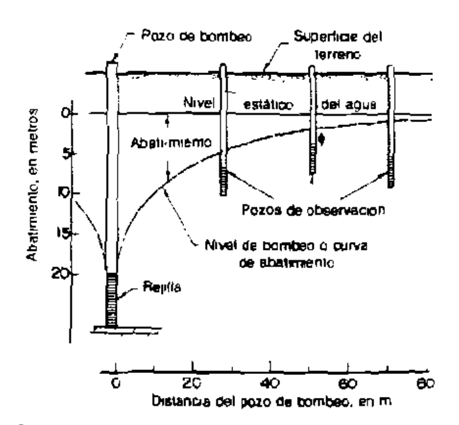


Fig. 67: Traza de la mitad del cono de depresión, mostrando la variación del abatimiento con la distancia al pozo de bombeo.

Un término más apropiado para describir la diferencia de carga o presión que se requiere para inducir una cierta razón de flujo entre un punto y otro en un acuífero, es el de pérdida de carga. Esta representa la fuerza que se necesita para vencer la resistencia al flujo. Las pérdidas de carga de un punto a otro, a lo largo de la curva de niveles de bombeo mostrada en la Fig. 67, son los cambios de abatimiento que tienen lugar entre estos puntos.

Supongamos, por ejemplo, que se está bombeando un pozo a caudal constante de 45 m.^{3} por hora. A una distancia de 6 m. del pozo de bombeo, el abatimiento es de alrededor de 1.80 m. Esto indica que se requiere una carga de 1.80 m. para forzar el escurrimiento de 45 m^3/hora a través de la formación, desde el límite exterior del cono de depresión, hasta una distancia de 6 m. del pozo. Se requieren también otros 1.80 m. de carga para desplazar los mismos 45 m^3/hora desde una distancia de 6 m. hasta alrededor de 1.5 m. del pozo. En este punto, el abatimiento es de alrededor de 3.6 m. El resto del abatimiento total o pérdida de carga se utiliza en impulsar

el agua a través de los últimos 1.50 m. de la formación y a través de la rejilla del pozo. El abatimiento total de 6 m. medido en el pozo. es la carga en metros necesaria para mover los 45 m^3/hora a través del acuífero (dentro de la zona de influencia del pozo) y dentro del pozo. El ejemplo anterior demuestra que se requiere gastar más carga en una distancia horizontal dada, cuando el agua se aproxima a la perforación. Lo anterior tiene lugar debido a que el flujo converge al aproximarse al pozo, el área a través de la cual se mueve el agua disminuye gradualmente y la velocidad aumenta también contínuamente, dando todo por resultado una mayor pérdida de carga por unidad de distancia a lo largo de la trayectoria del flujo.

Definición de Términos

Algunos de los términos utilizados al discutir la hidráulica de los pozos, ya fueron definidos en los Capítulos 2 y 5. Los demás se definirán a continuación.

Radio de Influencia, R, es la distancia desde el centro del pozo hasta el límite del cono de depresión. Este radio es mayor en los conos de depresión que rodean a pozos artesianos que en aquéllos situados alrededor de pozos freáticos.

Coeficiente del Almacenamiento, S, de un acuífero, es el volumen de agua cedida o tomada del almacenamiento del mismo, por unidad de área superficial cuando se produce un cambio unitario de carga. En los acuíferos de nivel freático, *S* equivale al rendimiento específico del material desecado durante el bombeo. En los acuíferos artesianos, *S* es el resultado de dos efectos elásticos, la compresión del acuífero y la expansión del agua contenida en éste, cuando la carga o presión es reducida por el bombeo. El coeficiente de almacenamiento es un término adimensional. El valor de *S* en los acuíferos libres varía desde 0.01 hasta 0.35; estos valores en un acuífero artesiano, van desde 0.00001 hasta 0.001.

Coeficiente de Transmisividad, T de un acuífero, es la razón a la cual fluye el agua a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado del mismo, cuando el gradiente hidráulico es igual a 1. o sea 100 por ciento.

Los valores del coeficiente de transmisividad varían desde un poco menos de 0.50 hasta más de 500 metros^3/hora/m. Un acuífero cuya transmisividad sea menor de 0.50 metros^3 por hora/m. puede únicamente suministrar agua para usos domésticos o similares. Cuando la transmisividad es del orden de 5.00 metros^3/hora/m., o mayor, el rendimiento será adecuado a propósitos industriales, municipales o de riego.

Los coeficientes de transmisividad y de almacenamiento son especialmente importantes puesto que definen las características hidráulicas de la formación acuífera. El coeficiente de transmisividad indica cuánta agua se mueve a través de la formación y el coeficiente de almacenamiento indica qué cantidad puede ser obtenida por bombeo o drenaje. Si en un acuífero particular se pueden determinar ambos coeficientes, se podrán efectuar predicciones de gran significación. Algunas de éstas son:

- Capacidad específica de pozos de diferentes tamaños.
- Abatimiento en el acuífero a diversas distancias del pozo de bombeo.
- El abatimiento en un pozo en cualquier tiempo después de haber comenzado el bombeo.

Flujo Inicial Desde el Acuífero al Pozo

Cuando se bombea agua de un pozo, la cantidad que se obtiene inicialmente proviene de lo almacenado en el acuífero en la vecindad del mismo. Conforme continúa el bombeo, se va obteniendo más agua de la almacenada a distancias cada vez mayores del pozo de bombeo. Esto significa que la

forma circular del cono de depresión se debe expandir de modo que se desplace agua hacia el pozo desde distancias cada vez mayores. El radio de influencia del pozo aumenta conforme el cono continúa expandiéndose. El abatimiento también aumenta conforme el cono se profundiza para suministrar la carga adicional necesaria, a fin de que el agua se desplace desde una distancia mayor. Sin embargo, el cono se expande y se ahonda a una velocidad que disminuye con el tiempo, puesto que con cada metro adicional de expansión horizontal, se dispone de un volumen de agua almacenada mayor que en el precedente.

La Fig. 69 ilustra cómo se expande el cono de depresión durante intervalos iguales de tiempo. Supongamos que después de 1 hora de bombeo el radio del cono de depresión es de 120 m. y su profundidad en el pozo, de 1.80 m. Al final de la segunda hora, el radio del cono se puede haber expandido hasta 170 m. y su profundidad aumentado hasta 1.89 m. Por lo tanto, en la segunda hora el cono sólo se ha extendido hacia afuera 50 m. y se ha ahondado únicamente 9 centímetros. La tercera hora de bombeo produce una expansión radial adicional de solamente 40 m. y un aumento de la profundidad de sólo 6 centímetros. El cálculo del volumen de cada uno de los conos mostrará que C_2 tiene un volumen de dos veces C_1, y C_3 un volumen tres veces mayor que el de C_1. A razón constante de

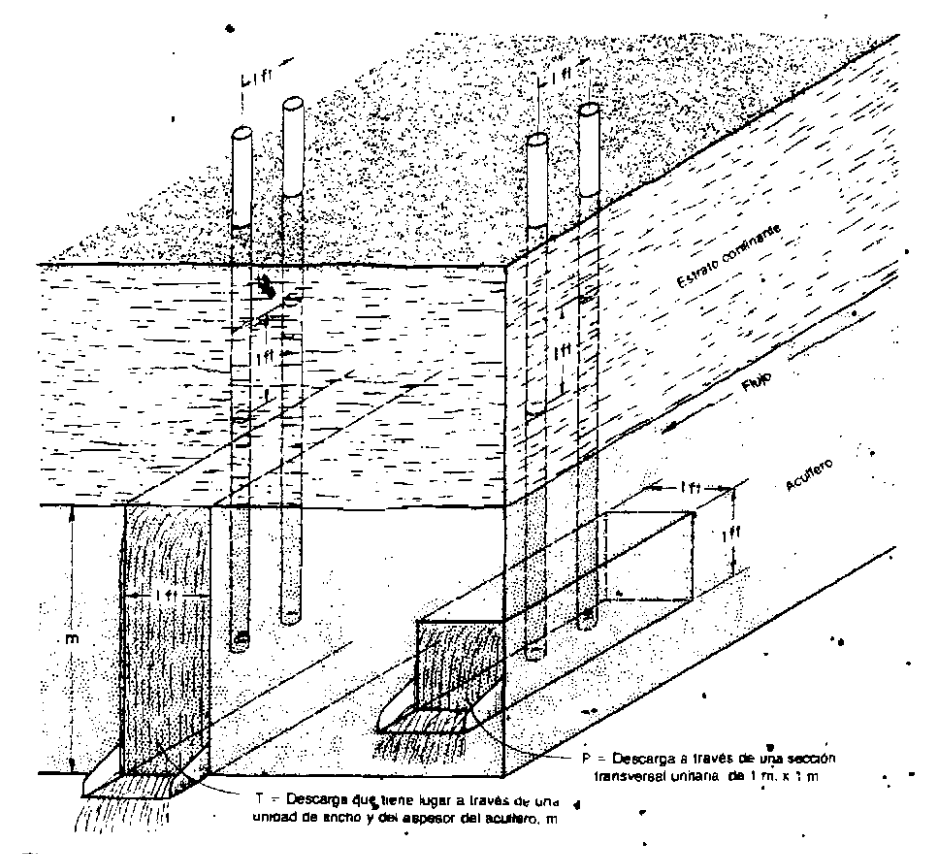


Fig. 68: Conceptos gráficos de los coeficientes de permeabilidad y transmisividad. El coeficiente de permeabilidad, multiplicado por el espesor del acuífero es igual al coeficiente de transmisividad.

bombeo, esto tiene lugar puesto que en cada hora se ha descargado el mismo volumen de agua.

Mediante el ejemplo anterior, vemos que después de algunas horas, resulta imposible apreciar la profundización o expansión del cono durante intervalos cortos del tiempo de bombeo. Esto conduce a menudo a los observadores a creer que el cono ha alcanzado una posición estabilizada y que no descenderá ni se expanderá más, aunque continúe el bombeo. Sin embargo, el hecho es que el cono continuará creciendo hasta que el acuífero reciba una recarga igual a la extracción. La recarga puede tener lugar en una o más de las formas siguientes:

1. El cono se extiende hasta interceptar una recarga natural del acuífero, suficiente para igualar el caudal de bombeo.

2. El cono se extenderá hasta interceptar alguna masa superficial de agua que pueda suministrar al acuífero la cantidad necesaria para igualar la descarga.

3. El cono se extenderá hasta interceptar la suficiente recarga vertical, de la precipitación que caiga dentro del radio de influencia, que iguale a la descarga.

4. El cono se extiende hasta que exista la suficiente percolación a través de las formaciones sub o sobreyacientes, que iguale a la descarga.

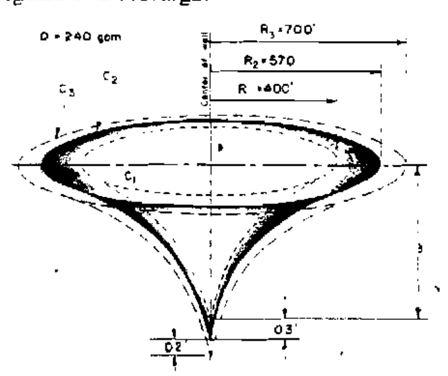


Fig. 69: Cambios en el radio y profundidad del cono de depresión, después de transcurrir intervalos iguales de tiempo y suponiendo caudal constante de bombeo.

Cuando el cono detiene su expansión debido a una o varias de las razones anteriores, se alcanza una condición de equilibrio. Ya no se observará ningún incremento de abatimiento con el transcurso del tiempo de bombeo. En algunos pozos, el equilibrio se presenta en unas pocas horas después de haber empezado el bombeo; en otros éste nunca se alcanza aunque el período de bombeo se extienda por años.

Fórmulas del Régimen de Equilibrio

Varios investigadores derivaron hace varios años, las fórmulas de la descarga de pozos en régimen de equilibrio.[1,2,3] Existen dos fórmulas básicas, una para condiciones libres o freáticas y otra para artesianismo. Ambas suponen que existe recarga en la periferia del cono de depresión. La Fig. 70 muestra una sección vertical de un pozo construído en un acuífero libre. La fórmula para el pozo en condiciones libres, es la siguiente:

$$Q = \frac{1.36\, P\, (H^2 - h^2)}{\log \frac{R}{r}} \qquad (1)$$

expresión en la cual:

Q = rendimiento del pozo o caudal de bombeo, en m.³ por hora.
P = permeabilidad de la formación, en m/bora.
H = espesor saturado del acuífero, antes del bombeo, en m.
h = profundidad del agua en el pozo, durante el bombeo, en m.
R = radio del cono de depresión, en m.,
r = radio del pozo en m.

La Fig. 71 es la sección vertical de un pozo en un acuífero artesiano. La fórmula para un pozo que opera en condiciones de artesianismo, es la siguiente:

$$Q = \frac{2.72\, Pm\, (H-h)}{\log \frac{R}{r}} \qquad (2)$$

expresión en la cual:

m = espesor del acuífero, en m.
H = carga estática sobre el fondo del acuífero, en m.

Todos los otros términos son tal como quedaron definidos en la ecuación (1)

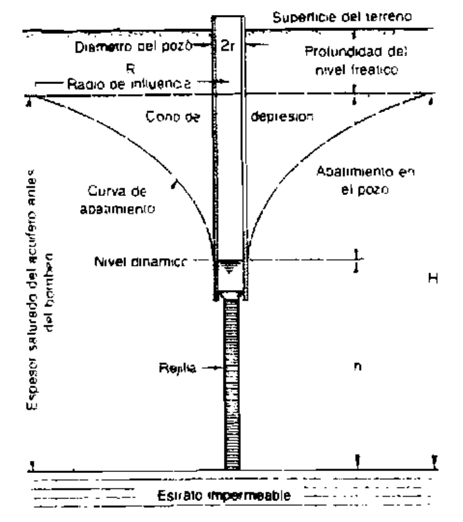


Fig. 70: Diagrama de un pozo libre o freático, en el que se muestra el significado de varios términos empleados en la formula de equilibrio.

Las derivaciones de las fórmulas anteriores, se basan en las siguientes premisas de simplificación:

1. Los materiales de la formación acuífera son de permeabilidad uniforme dentro del radio de influencia del pozo.

2. El acuífero no se halla estratificado.

3. En un acuífero freático, el espesor saturado es constante antes de empezar el bombeo; en un acuífero artesiano, el espesor de éste es constante.

4. El pozo de bombeo es 100 por ciento eficiente.

5. El pozo de bombeo penetra hasta el fondo del acuífero.

6. Las superficies freática y piezométrica, no tienen pendiente, ambas constituyen planos horizontales.

7. A través del acuífero y dentro del radio de influencia del pozo, existe flujo laminar.

8. El cono de depresión ha alcanzado el equilibrio, de modo que tanto el abatimiento como el radio de influencia del pozo, no sufren cambio alguno a través del tiempo en que se continúe bombeando a caudal constante.

Estas suposiciones pareciera que limitan severamente el uso de las dos fórmulas. En la realidad, sin embargo, ello no es así.

Una permeabilidad uniforme rara vez se encuentra en un acuífero real, pero la permeabilidad media que se determina mediante una prueba de acuífero, ha demostrado ser confiable para la predicción del comportamiento de los pozos. En los pozos artesianos, en donde la mayor parte del espesor del acuífero es penetrada y enrejillada, la suposición de que no existe estratificación no constituye una limitación de importancia. En los acuíferos libres, en los cuales el abatimiento reduce considerablemente el espesor saturado, el problema puede resolverse cuando se conoce la estratificación y ello se toma en cuenta al aplicar la fórmula.

La suposición de espesor constante no

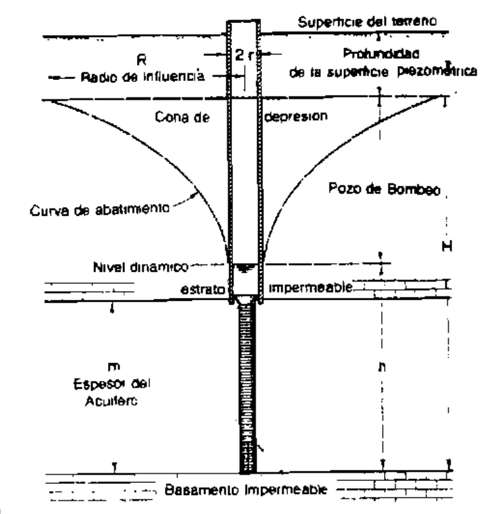


Fig. 71: Diagrama de un pozo emplazado en un acuífero artesiano, que muestra el sentido de los diversos términos que se usan en la fórmula de equilibrio.

implica una limitación severa, puesto que las variaciones del espesor del acuífero dentro del cono de depresión, son relativamente pequeñas en la mayoría de los casos. Cuando los cambios de espesor son significativos, éstos pueden tenerse en cuenta, tal como se explicará más adelante.

Suponer que un pozo es 100 por ciento eficiente, puede introducir un error serio en el cálculo del rendimiento de éste, el cual podría ser ineficiente como resultado de un inadecuado diseño y construcción. Los factores que contribuyen a la ineficiencia se discutirán más adelante.

La suposición de que las superficies freática o piezométrica son horizontales antes de empezar el bombeo, nunca se verificará.

Sin embargo, la pendiente o gradiente hidráulico es por lo general muy plana y su efecto al calcular el rendimiento del pozo es despreciable en la mayoría de los casos. La pendiente de la superficie freática o de la piezométrica, causará la distorsión del cono de depresión, haciéndolo más elíptico que circular.

Se considera que el flujo es laminar en toda la extensión del acuífero. Algunos investigadores han establecido la teoría de que debido a altas pérdidas de carga, el flujo es turbulento en la proximidad del pozo. Los ensayos reales de laboratorio y de campo han demostrado, sin embargo, que cierta alteración de la condición de flujo laminar en la proximidad del pozo, causa apenas una pérdida adicional de carga de proporciones menores.[4]

Determinación de la Permeabilidad del Acuífero

Las fórmulas (1) y (2) pueden utilizarse para calcular el rendimiento del pozo, si se conocen P, H, m y R. El registro litológico del pozo suministra los valores de H y m; R por lo general se estima; P puede determinarse mediante ensayos de campo o de laboratorio. La fórmula para calcular P en un acuífero freático es la siguiente:

$$P = \frac{Q \cdot \log r_2/r_1}{1.36\,(h_2^2 - h_1^2)} \qquad (3)$$

en la cual:

P = permeabilidad, en metros por hora

Q = caudal de bombeo, en metros cúbicos por hora.

r_1 = distancia al pozo de observación más cercano, en metros.

r_2 = distancia al pozo de observación más lejano, en metros.

h_2 = espesor saturado, en metros, en el sitio del pozo de observación más alejado.

h_1 = espesor saturado, en metros, en el sitio del pozo de observación más cercano.

La Fig. 72 muestra una vista en sección de un esquema de prueba de bombeo en una formación freática, realizada con el propósito de determinar la permeabilidad de ésta. Todos los factores pertinentes pueden medirse fácilmente en este tipo de prueba y se puede determinar así con precisión la permeabilidad de la formación.

La fórmula para determinar la permeabilidad en condiciones artesianas mediante una prueba como la indicada, es la siguiente:

$$P = \frac{Q \log \frac{r_2}{r_1}}{2.72\, m\, (h_2 - h_1)} \qquad (4)$$

en la cual:
todos los términos, excepto los siguientes, son los mismos de la fórmula (3)

m = espesor del acuífero, en metros.

h_2 = carga, en metros, en el sitio del pozo de observación más lejano, medida desde el fondo del acuífero.

h_1 = carga, en metros, en el sitio del pozo de observación más cercano, medida desde el fondo del acuífero.

Además de brindar una manera precisa de calcular la permeabilidad media del acuífero, las fórmulas de equilibrio resultan muy útiles para estudiar las relaciones existentes entre los diversos factores entre sí, y para determinar el rendimiento. Estas fórmulas muestran, por ejemplo, que la descarga es directamente proporcional a la permeabilidad, si se mantienen los otros factores constantes. Una formación que duplique la permeabilidad de otra, dará un rendimiento doble.

En un acuífero artesiano, la fórmula (2) indica que el rendimiento es directamente proporcional al espesor saturado de la formación, si los otros factores se mantienen constantes.

Relación Entre el Diámetro del Pozo y la Descarga

¿En qué proporción afectará el radio o el diámetro del pozo a la descarga? Muchas personas suponen que al duplicar el diámetro del pozo, se duplica su rendimiento. Esto se halla bien lejos de la realidad. Con todos los otros factores constantes, la fórmula (1) nos muestra que: Q varía conforme varía $K \log R/r$, expresión en la cual K representa a todos los términos constantes.

De esta relación se puede calcular el incremento teórico de rendimiento que resultaría de aumentar el diámetro del pozo. La Tabla XIII nos muestra los valores que se obtienen cuando R = 120 m., magnitud muy común en condiciones freáticas.

Tabla XIII

Relación Entre el Diámetro del Pozo y la Descarga, en Porcentaje

Diámetro de Pozos						
6"	12"	18"	24"	30"	36"	48"
100	110	117	122	127	131	137
—	100	106	111	116	119	125
—	—	100	104	108	112	117
—	—	—	100	104	107	112
—	—	—	—	100	103	108
—	—	—	—	—	100	105

Estas relaciones se aplican tanto a la capacidad específica como a la descarga total. Por ejemplo, si un pozo de 30

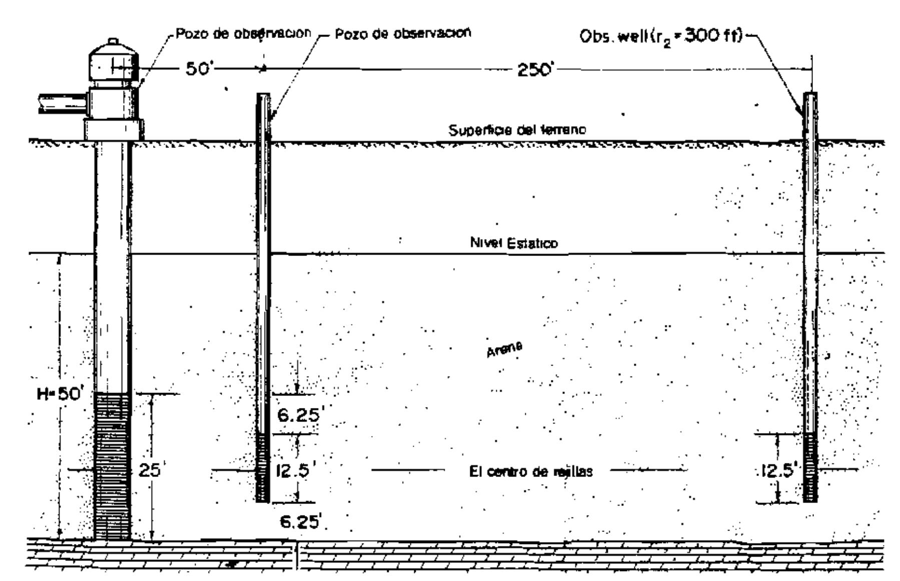


Fig. 72: Distribución típica de un pozo de bombeo y de los pozos de observación para la obtención de datos de campo necesarios en el cálculo del coeficiente de permeabilidad mediante el uso de fórmulas de descarga.

centímetros produce 20 litros por segundo por metro de abatimiento, un pozo de 60 centímetros de diámetro, en el mismo sitio, producirá una descarga de 111 por ciento, o sea, 22,2 litros por segundo por metro de abatimiento. La Tabla muestra que al duplicar el diámetro de un pozo en condiciones freáticas se aumentará su rendimiento en solamente un 11 por ciento.

En pozos artesianos, en los cuales R es mucho más grande, siendo un valor característico unos 1.500 m., el porcentaje de aumento debido a la duplicación del diámetro es menor y por lo general de un 7 por ciento.

Estas comparaciones indican que el diámetro del pozo es digno de especial consideración. En el Capítulo 10 se dan algunas reglas que permiten seleccionar el diámetro adecuado en situaciones dadas. En algunos casos puede ser muy conveniente aumentar el tamaño del pozo para obtener un 15 ó 25 por ciento más de agua. La decisión depende del estudio de cada caso particular, y del costo que ello implique.

Relación Entre el Abatimiento y la Descarga

La fórmula (2), para pozos que funcionan en condiciones artesianas, demuestra que la descarga es directamente proporcional al abatimiento, *H-h*, siempre y cuando este abatimiento no sobrepase la distancia desde la superficie piezométrica estática hasta el techo del acuífero. Si el abatimiento excede de esta magnitud, el valor de *m* se reducirá y esa proporcionalidad ya no se mantiene. Teóricamente, ello significa que si el abatimiento se duplica, el rendimiento también lo hace. Dicho de otra manera, la capacidad específica del pozo es constante, para una razón constante de bombeo, siempre que el acuífero no se deseque.

Para un pozo ubicado en un acuífero freático, aquella parte de la formación, comprendida dentro del cono de depresión, es realmente desecada durante el bombeo. Esto influye en la relación que existe entre el abatimiento y la descarga. Cuando el abatimiento se duplica, el rendimiento del pozo llega a ser menos del doble. La capacidad específica disminuye conforme aumenta el abatimiento; de hecho, disminuye directamente en proporción al abatimiento.

La Fig. 73 muestra la relación que existe entre abatimiento, descarga y capacidad específica, en un pozo de condiciones freáticas. La curva sólida muestra la relación entre abatimiento y descarga. Abatimiento máximo se refiere al descenso del nivel del agua hasta el fondo del pozo; 50 por ciento de abatimiento significa un descenso del nivel del agua hasta un punto situado a la mitad de la distancia entre el nivel estático y el fondo del pozo.

Rendimiento o descarga máxima, es la cantidad de agua que el pozo produce al abatimiento máximo o 100 por ciento de éste. Como un ejemplo de lo anterior, supongamos que un pozo de 36 m. de profundidad tiene un nivel estático de 6 m. y que el espesor saturado del acuífero es de 30 m. Durante una prueba el pozo fue bombeado a 23 m³/h., y el nivel dinámico se

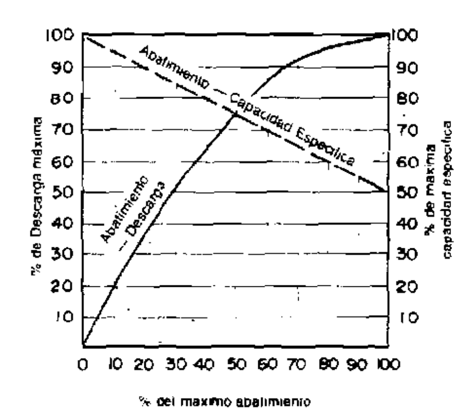


Fig. 73: Relaciones entre porcentaje de abatimiento y descarga y entre porcentaje de abatimiento y capacidad específica, para un pozo en condiciones freáticas y en un acuífero freático homogeneo.

estabilizó a 12 m. por debajo de la superficie; o sea, se produjo un abatimiento de 6 m. ¿ Cuál sería la descarga si el abatimiento hubiese sido de 12 m. y el nivel dinámico hubiese alcanzado una profundidad de 18 m.?

En este caso, el 100 por ciento de abatimiento corresponde a 30 m. Los 6 m. de abatimiento que tuvieron lugar durante el bombeo, equivalen al 20 por ciento del abatimiento total posible. La curva sólida de la Fig. 73, muestra que con 20 por ciento de abatimiento, la descarga es el 36 por ciento de la capacidad máxima del pozo; luego, los 23 m³/hora equivalen al 36 por ciento de la capacidad máxima. Por otro lado, el abatimiento de 12 m. corresponde al 40 por ciento del abatimiento total posible. La curva sólida nos indica que este abatimiento permitiría obtener 64 por ciento de la capacidad máxima del pozo. Si 23 m³/hora corresponden al 36 por ciento del máximo, entonces, 64 por ciento de ese máximo será igual a.

64/36 x 23 = 41 metros cúbicos por hora:

Se espera entonces que el pozo rinda 41 m³/hora, con un abatimiento de 12 m.

La línea interrumpida de la Fig. 73, muestra la variación de la capacidad específica en función del abatimiento. Teóricamente, la máxima capacidad específica corresponde a abatimiento cero, puesto que no habría reducción del espesor saturado. El mínimo valor tiene lugar cuando el abatimiento y la descarga son máximos. Nótese que la mínima capacidad específica es 50 por ciento de la máxima. En el ejemplo anterior, vemos que se podría obtener 90 por ciento de la máxima capacidad específica, con 6 m. de abatimiento, y 80 por ciento, con 12 m.

Las características óptimas de funcionamiento de un pozo se obtienen cuando el producto de la capacidad específica por la descarga, es un máximo. Se puede demostrar matemáticamente que lo anterior tiene lugar aproximadamente al 67 por ciento del abatimiento máximo. En este hecho se basa la práctica usual de diseño, de colocar la rejilla en el tercio inferior de las formaciones freáticas homogéneas.

El diagrama muestra cómo resulta antieconómico hacer funcionar un pozo con un abatimiento mayor del 70 por ciento del máximo. A 70 por ciento del abatimiento máximo, se obtiene un 92 por ciento de la máxima descarga posible. Para obtener el 8 por ciento restante, se necesitaría un 30 por ciento adicional de abatimiento. Obviamente, el costo extra de bombeo no guardaría ninguna proporción con la ganancia en rendimiento.

Fórmulas del Régimen de no Equilibrio

En 1935, Theis desarrolló la fórmula de no equilibrio que se aplica a pozos que funcionan dentro de este régimen. La fórmula de Theis fue la primera que tuvo en cuenta el efecto del tiempo de bombeo en la descarga. Su derivación constituyó un avance notable en el campo de la hidráulica de aguas subterráneas. Mediante el uso de la fórmula, se puede predecir el abatimiento a cualquier tiempo después de iniciado el bombeo. La transmisividad y la permeabilidad promedio pueden determinarse desde las primeras etapas de una prueba de bombeo, sin tener que esperar a que los niveles en los pozos de observación, se hayan virtualmente estabilizado o alcanzado el equilibrio. Los coeficientes de acuífero se pueden determinar a partir de las mediciones de tiempo – abatimiento realizadas en un solo pozo, en lugar de tener que utilizar dos pozos de observación, como lo exige cualquiera de las fórmulas (1) ó (2).

La derivación de la fórmula de Theis se basa en las siguientes suposiciones:

1. La formación acuífera es de carácter y

permeabilidad uniformes tanto en la dirección horizontal, como en la vertical.

2. La formación es de un espesor uniforme

3. La formación es de una extensión superficial infinita.

4. El acuífero no recibe ninguna recarga.

5. El pozo de bombeo penetra totalmente y recibe agua de todo el espesor saturado del acuífero.

6. El agua retirada del almacenamiento, es descargada instantáneamente al descender la altura de presión.

Estas suposiciones son esencialmente las mismas que corresponden a las fórmulas de equilibrio, excepto que los niveles del agua dentro del área del cono de depresión, no necesitan haberse estabilizado o alcanzado el equilibrio.

En su forma más sencilla, la fórmula de Theis es la siguiente:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) = \frac{0.0795\, Q}{T} W(u) \quad (5)$$

en la cual:

s = abatimiento, en metros, en cualquier punto de la vecindad de un pozo que se esté bombenado a caudal constante.

Q = Caudal de bombeo, en m^3/hora.

$W(u)$ = "función u de pozo" que corresponde al integral exponencial que se escribe a continuación:

$$W(u) \int_{u}^{-00} \frac{e^{-u}}{u}\, du = -0.5772 - \log_e u \quad (5a)$$

$$+ u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \cdots$$

En esta expresión, $u = 1.87 r^2 S/Tt$, cuyos términos significan:

r = distancia en metros desde el centro del pozo de bombeo al punto en que se mide el abatimiento

S = coeficiente de almacenamiento, adimensional.

T = coeficiente de transmisividad, en m^3/hora/metro.

t = tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo, en horas.

Si la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento se conocen, éstos y otros valores se pueden sustituir en la fórmula para obtener la incógnita deseada.

Como ejemplo, supongamos que la transmisividad de un acuífero artesiano es de 26 m^3/hora y por metro y su coeficiente de almacenamiento, de 5×10^{-4}, valor característico de las condiciones artesianas. ¿Cuál sería la capacidad específica, Q/s de un pozo de 30 cm. de diámetro, después de transcurrido un día de bombeo continuo?

En este caso, $r = 0.15$ m. y $t = 24$ horas. Primeramente calculamos el valor de u

$$u = \frac{(0.15)^2 \times 5 \times 10^{-4}}{4 \times 26 \times 24} = 4.5 \times 10^{-9}$$

A continuación, se obtiene el valor de $W(u)$ correspondiente al anterior valor de u, de la Tabla XIV que se ofrece en el Apendice.

En este caso $W(u)$ es igual a 18.60. Escribiendo de otro modo la fórmula (5), tendremos que:

$$Q/s = \frac{T}{0.0795\, W(u)} = \frac{26}{0.0795 \times 18.64}$$

$= 17.6$ m^3/hora/metro de abatimiento.

Una vez calculada la capacidad específica, se puede determinar el abatimiento para cualquier caudal de descarga en el pozo de bombeo. Si la razón de bombeo es de 45 m^3/hora, resulta un valor para el abatimiento, de:

$$s = Q/Q/s = 45/17.6 = 2.56 \text{ m.}$$

Los cálculos anteriores suponen que el pozo es 100 por ciento eficiente. Si el pozo estuviese descargando 45 m^3/hora, ¿cuál sería el abatimiento a 300 m. del pozo de bombeo, después de transcurrido un día?

$$u = \frac{(300)^2 \times 5 \times 10^{-4}}{4 \times 26 \times 24} = 1.6 \times 10^{-2}$$

Para este valor de u, la Tabla XIV del Apéndice nos da un valor de $W(u) = 3.57$, que sutituido en la ecuación (5) nos dará un valor del abatimiento de.

$$s = \frac{0.0795 \times 45 \times 3.57}{26} = 0.49 \text{ m.}$$

El resultado obtenido es independiente de la eficiencia del pozo de bombeo.

El uso de la fórmula de Theis para la determinación de T y S, mediante un ensayo de bombeo, exige que se tomen medidas del abatimiento en por lo menos un pozo de observación. Las mediciones deberán efectuarse a intervalos de tiempo convenientes, después de iniciado el bombeo. También pueden utilizarse las mediciones realizadas en más de un pozo de observación.

No es posible el cálculo directo con el empleo de las ecuaciones (5) y (5a). Sin embargo, el mismo Theis desarrolló un método gráfico de solución, que permite encontrar T y S si se conocen los valores de los otros términos.

El método se basa en la superposición de una curva construida con los datos de la prueba, sobre una curva patrón que se prepara mediante el ploteo de valores de W(u) contra valores 1/u en papel de escalas logarítmicas, tal como se muestra en la Fig. 74. Para lo anterior, se utilizan los valores dados por la Tabla XIV. Los datos obtenidos en la prueba, son llevados también a un papel doblemente logarítmico, mediante un gráfico semejante al de la curva patrón.

La Tabla XV muestra algunos datos obtenidos en una prueba de bombeo. Los valores del abatimiento fueron medidos en un pozo de observación situado a una distancia de 120 m. del pozo de bombeo, del cual se extrajo un caudal constante de 113 m^3/hora.

Tabla XV
Mediciones del Abatimiento en el Pozo de Observación

Tiempo desde el inicio del bombeo en minutos	Abatimiento en pies
1	0.16
1.5	0.27
2.0	0.38
2.5	0.46
3.0	0.53
4.0	0.67
5.0	0.77
6.0	0.87
8.0	0.99
10.0	1.12
12.0	1.21
14.0	1.30
18.0	1.43
24.0	1.58
30.0	1.70
40.0	1.88
50.0	2.00
60.0	2.11
80.0	2.24
100.0	2.38
120.0	2.49
150.0	2.62
180.0	2.72
210.0	2.81
240.0	2.88

La Fig. 75 muestra los datos llevados a un papel de rayado aritmético corriente. La curva muestra cómo el abatimiento aumenta rápidamente al inicio, disminuyendo su crecimiento con el transcurrir del tiempo, dando la impresión de que el nivel del agua tendería a estabilizarse si el período de prueba se extendiera lo suficiente. Puesto que las medidas indican que el nivel del agua todavía está descendiendo después de los 240 minutos de bombeo, es evidente que las fórmulas de equilibrio no podrían aplicarse. En este caso, se requiere efectuar un análisis adecuado utilizando el concepto de no equilibrio de Theis.

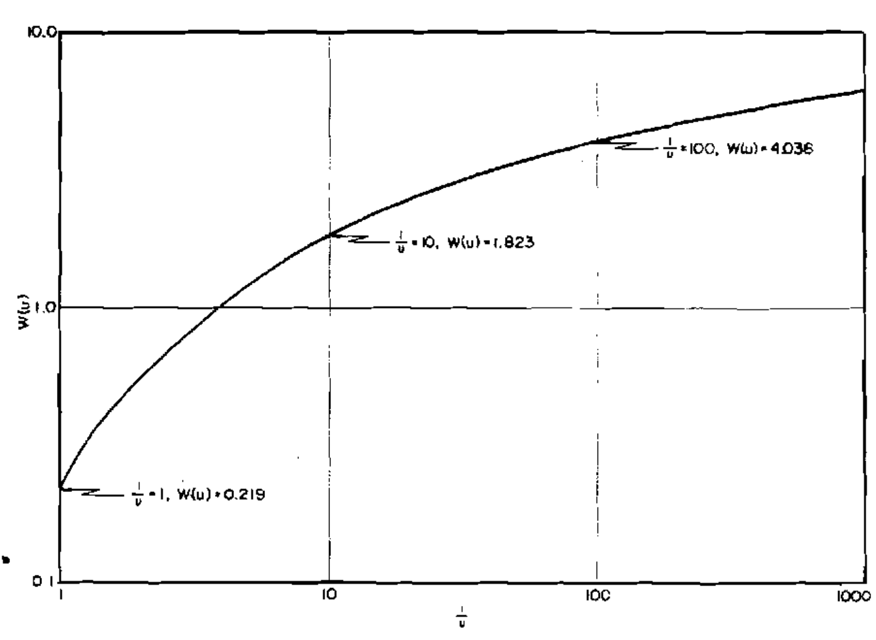


Fig. 74: Curva característica que se usa en la solucion gráfica de la fórmula de no equilibrio de Theis, la cual muestra los valores de W(u) correspondientes a valores de 1/u. La curva ha sido trazada en papel logarítmico.

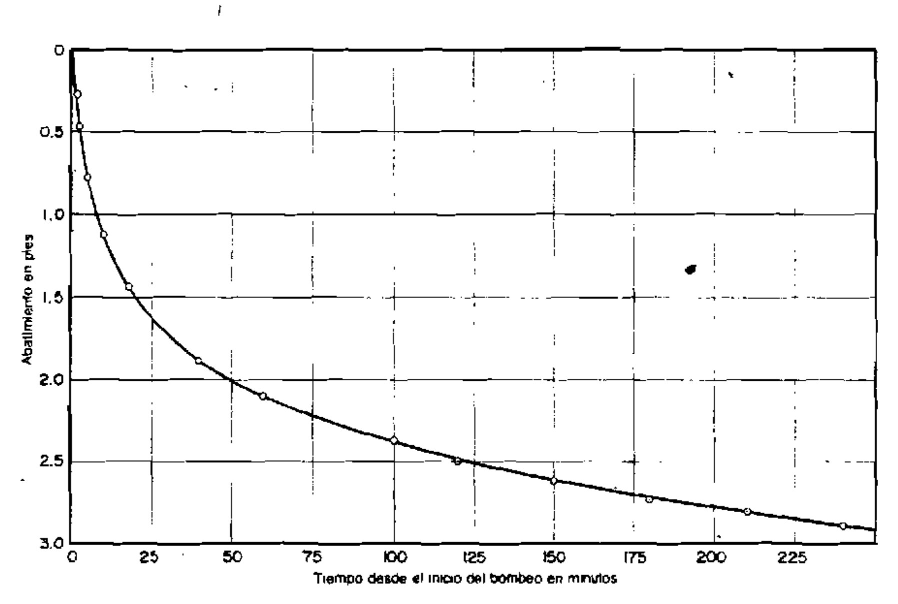


Fig. 75: Los datos de la Tabla XV, llevados a un grafico de papel aritmético, muestran cómo el abatimiento varía en función del tiempo de bombeo. El nivel del agua desciende rápidamente al inicio, pero la razón de descenso disminuye, conforme transcurre el tiempo de bombeo. Corresponde la gráfica a una descarga constante de 113 m³/hora. El análisis de los datos suministrados por la prueba, exige el uso del concepto de no equilibrio de Theis.

En términos generales, los datos de la prueba pueden plotearse de cualquiera de las tres maneras siguientes:

Método	Escala Vertical Logarítmica	Escala Horizontal Logarítmica
(a)	Abatimiento, s	t
(b)	Abatimiento, s	t/r^2
(c)	Abatimiento, s	t/r^2

El método (c) queda restringido a los casos en que los datos se han obtenido mediante tres o más pozos de observación.

Para resolver el problema por la fórmula de no equilibrio, los datos se plotean en papel logarítmico, tal como se muestra en la Fig. 76. El método (a) es el que se ha empleado en este ejemplo, registrando los abatimientos en el eje vertical y los tiempos desde que se inicia el bombeo, en el eje horizontal. Luego, este gráfico se superpone sobre la curva patrón o tipo, y manteniendo paralelos los ejes principales de ambos gráficos, se trata de hacer coincidir los datos de la prueba con la curva patrón, por lo menos en una porción de ésta.

Una vez obtenida una buena superposición o coincidencia, se escoge un punto cualquiera en la región en que las curvas presentan el mejor ajuste. Es conveniente que el punto se escoja de modo que las coordenadas de la curva tipo sean conocidas. Esto simplifica el cálculo.

En la Fig. 76a, la coincidencia fue escogida sobre un punto de la curva patrón en que $1/u = 100$ y $W(u) = 4.038$. El punto correspondiente en el diagrama de tiempo — abatimiento tiene coordenadas tales que $s = 0.69$ m y $t = 83$ minutos, o lo que es igual, 83/60 horas.

Sustituyendo los datos anteriores en la fórmula (5) tendremos:

$$T = \frac{0.0795\ Q}{S}\ W(u)$$

$$= \frac{0.0795 \times 113}{0.69} \times 4.038$$

$$= 52.5 \text{ m}^3\text{/hora/metro}$$

Conocido el valor de T, podemos ahora calcular S mediante la fórmula:

$$S = 4uTt/r^2$$

Si $r = 120$ metros, que es la distancia desde el pozo de observación al de bombeo, tendremos que:

$$S = \frac{4 \times 0.01 \times 52.5 \times 83}{(120)^2 \times 60}$$

$$= 2 \times 10^{-4}$$

Brown [6] ha presentado razonamientos detallados de otras maneras de resolver la fórmula de no equilibrio mediante el procedimiento de superposición.

Fórmula Modificada de no Equilibrio

C. E. Jacob arribó a la conclusión de que cuando el valor de "u" es suficientemente pequeño, la fórmula de no equilibrio de Theis puede sustituirse, sin cometer gran error, por la siguiente expresión:

$$s = \frac{0.183\ Q}{T} \log \frac{2.25\ Tt}{r^2 S} \qquad (6)$$

Para aquellos valores de "u" menores de 0.05, la fórmula (6) conduce prácticamente a los mismos resultados que la fórmula (5). El valor de "u" se vuelve menor conforme aumenta t y disminuye r.

La fórmula (6) es válida para valores de t suficientemente grandes y valores de r muy pequeños.

En el caso particular de un caudal constante de bombeo, los valores de Q, T y S son fijos; en estas condiciones, la fórmula (6) nos muestra que el abatimiento s varía directamente con el log $t/r2$, siempre que u sea menor de 0.05. Mediante esta relación, se pueden establecer dos principios:

1. En un acuífero determinado y para cualquier punto específico, (r constante), s y t son las únicas variables de la fórmula (6). En estas condiciones, s varía con el log $K_1 t$, en donde K_1 representa a todos los términos constantes de la fórmula.

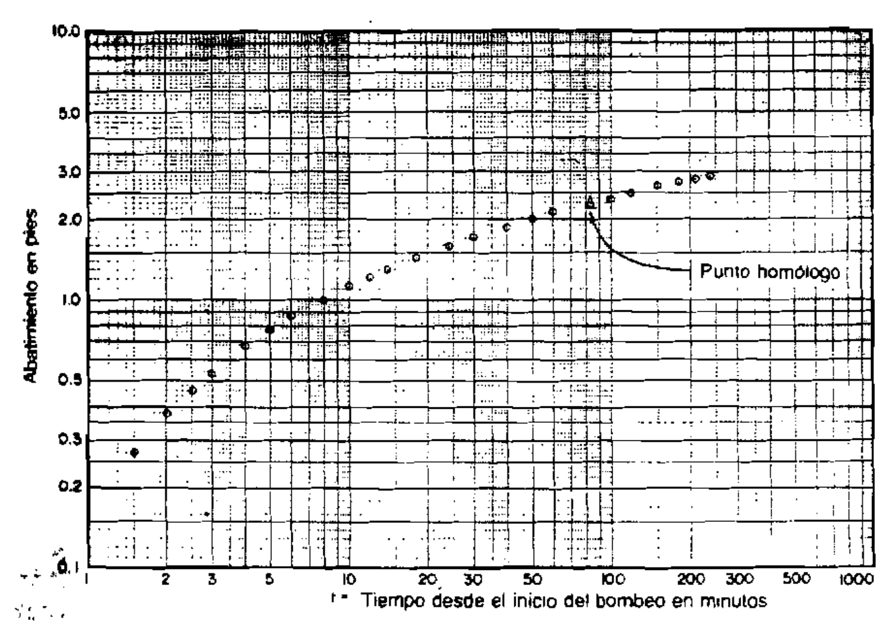


Fig. 76: Cuando los datos de la Tabla XV se plotean en un grafico de escalas logaritmicas, se obtiene una curva de forma similar a la de la Fig. 74.

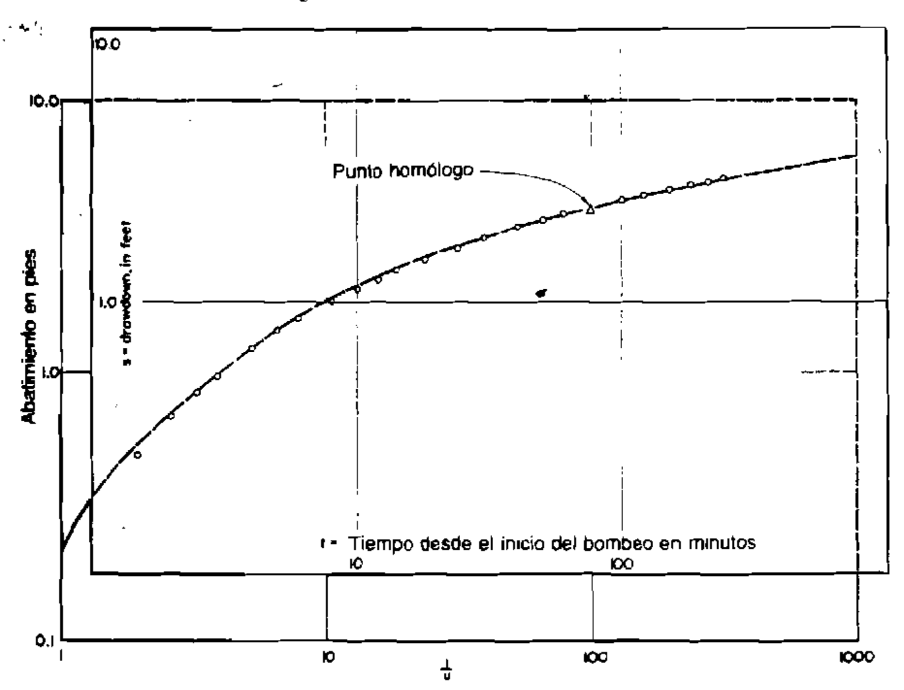


Fig. 76a: Diagrama de los puntos obtenidos en una prueba de bombeo, al ser sobrepuesto en la curva patrón en posición tal, que los puntos caigan sobre ésta. El punto de coincidencia se escogió de modo que 1/u = 100.

2. Para una formación dada y para un valor determinado de t, los términos s y r constituyen las únicas variables de la fórmula (6). En este caso, s varía con el log $K_2/r2$, expresión en la cual K_2 involucra a todos los términos que son constantes en la fórmula, incluyendo el valor específico de t.

Aplicando el primero de estos dos principios, se construye un gráfico de tiempo — abatimiento en papel semilogarítmico. El tiempo se traza en la escala logarítmica horizontal y el abatimiento se sitúa en la escala aritmética vertical. La Fig. 77 muestra los datos de la Tabla XV ploteados en el diagrama semilogarítmico. En este diagrama semilogarítmico, la mayor parte de los puntos caen en una línea recta, contrariamente a lo que sucede en las Figs. 75 ó 76, en que el trazo es curvo.

Resulta más sencillo trabajar con líneas rectas que con curvas. Por lo tanto, el ploteo semilogarítmico simplifica los cálculos y la interpretación de los resultados de una prueba de bombeo. Una sencilla transformación de la fórmula (6) permite un cálculo directo de la transmisividad mediante el uso del diagrama semilogarítmico.

Los puntos correspondientes a los primeros 10 minutos de bombeo, no caen sobre la recta de mejor ajuste, porque durante este período el valor de u es mayor que 0.05, y la fórmula modificada, no se puede utilizar en esta región.

El coeficiente de transmisividad se calcula a partir del caudal de bombeo y de la pendiente de la recta de tiempo – abatimiento, utilizando para ello la relación siguiente que se ha obtenido de la fórmula (6).

$$T = 0.183\, Q \;/\; \Delta s \qquad (7)$$

en la cual:

T = coeficiente de transmisividad, en m³/hora por metro.
Q = descarga del pozo de bombeo, en m³/hora.
Δs = pendiente de la recta, que se expresa como la diferencia de abatimiento entre dos valores del tiempo cuya relación sea de 10 en la escala logarítmica (un ciclo logarítmico).

En este ejemplo, S = 39.7 cm., es la variación del abatimiento entre tiempos de 10 y 100 minutos y el valor de la descarga Q es de 113.2 m³/hora. Por lo tanto:

T = 0.183 x 113.2 / 0.39 = 53.1 m³/hora/metro.

El resultado concuerda con el que se obtuvo con la curva patrón de Theis y por el método de superposición.

El coeficiente de almacenamiento se calcula también muy fácilmente mediante el gráfico, utilizando el tiempo correspondiente a un abatimiento nulo, el cual se obtiene mediante la prolongación de la recta del gráfico. Para ello se hace uso de una expresión derivada de la fórmula (6):

$$S = 2.25\, T\, t_0 \,/\, r2 \qquad (7a)$$

en la cual:

S = coeficiente de almacenamiento.
T = coeficiente de transmisividad en m³/hora/metro.
t_0 = tiempo correspondiente a la intersección de la prologación de la recta del gráfico, con el eje de abatimiento nulo, en horas.
r = distancia del pozo de bombeo al pozo de observación en que se han medido los abatimientos, en metros.

En nuestro ejemplo, t_0 = 1.44 minutos, o sea, 1.44/60 = 0.024 horas; T = 53.1 m³/hora/m, y r = 120 metros.

$$S = \frac{2.25 \times 53.1 \times 0.024}{(120)^2} = 1.99 \times 10^{-4}$$

El resultado concuerda plenamente con el que se obtuvo por medio de la curva patrón de Theis.

Los datos utilizados en este ejemplo, fueron obtenidos en un pozo de observación

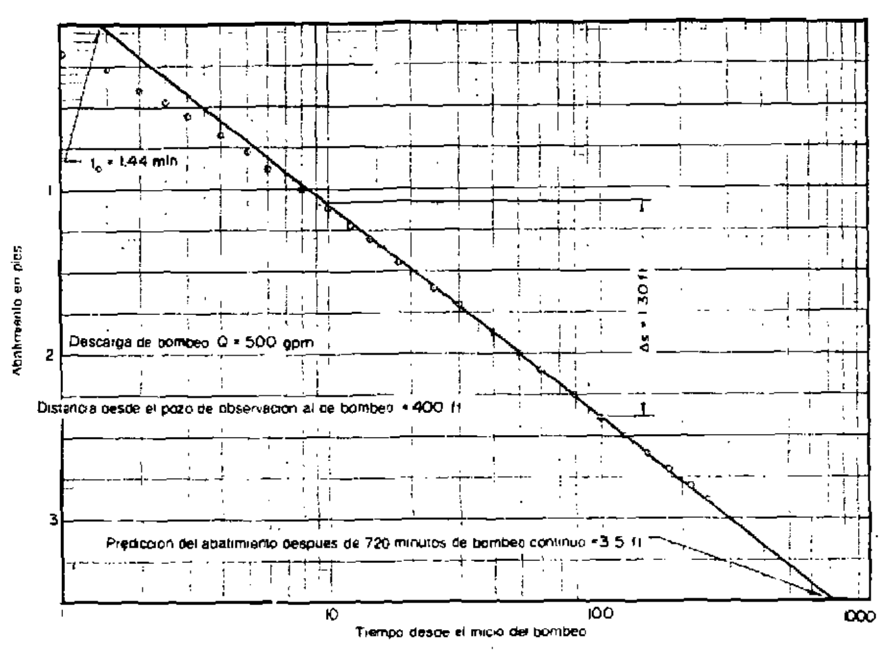


Fig. 77: Cuando los datos de la Tabla XV se llevan a un gráfico semilogarítmico, la mayor parte de los puntos, caen a lo largo de una linea recta. Se indican ademas los pasos para determinar Δs y t_0.

distante 120 m. del pozo de bombeo, el cual produjo una descarga constante de 113.2 m³/hora durante 240 minutos de bombeo. Si los datos hubiesen sido tomados en otro pozo más distante y los valores obtenidos se llevaran a la Fig. 77, obtendríamos una recta paralela a la de la figura y situada por encima de ésta. Si los datos se hubieran obtenido de un pozo más cercano al pozo de bombeo, obtendríamos otra línea recta, paralela también a la de la figura, pero situada por debajo. Los valores de T y S, calculados para los tres grupos de datos, darían el mismo resultado.

Además de utilizarse para el cálculo de las constantes del acuífero, el gráfico de tiempo – abatimiento proporciona un medio gráfico para la predicción de abatimientos futuros. Prolongando hacia la derecha la línea recta de la Fig. 77, obtendríamos el abatimiento en el pozo de observación, para cualquier período contínuo de bombeo, a un caudal de 113.2 m³/hora.

En nuestro ejemplo, el abatimiento que se prevee para 12 horas, ó 720 minutos de bombeo ininterrumpido, se obtiene en el punto en donde la prolongación de la recta hacia la derecha, intersecta a la ordenada correspondiente a los 720 minutos. La escala de los abatimientos nos muestra que para t = 720 minutos, el abatimiento es s = 1.07 m.

Si deseáramos conocer el valor del abatimiento después de 120 horas (5 dias) de bombeo continuo, el valor de Δs debería sumarse al abatimiento producido a las 12 horas. Nótese que 120 horas es equivalente a 10 x 12 horas. Por definición, Δs representa el incremento de abatimiento por cada ciclo de escala logarítmica. Entonces, después de 5 dias de bombeo a razón de 113.2 m³/hora, el abatimiento a una distancia de 120 m. del pozo de bombeo, sería de:

$$s = 1.07 + 0.397 = 1.467 \text{ metros}$$

Resulta evidente la utilidad de esta simple técnica. Una vez obtenida la pendiente de la recta de tiempo – abatimiento mediante una prueba de bombeo de corta duración, ésta puede extrapolarse para determinar el abatimiento que se espera tenga lugar a un período más extenso y a la misma descarga.

Resulta una buena práctica bombear un pozo artesiano durante 24 horas para así disponer de los datos necesarios al construir el gráfico de tiempos y abatimientos. Un pozo freático debe en cambio ser bombeado por 72 horas. El periodo de bombeo de 240 minutos utilizado en nuestro ejemplo resulta ser, en la mayoría de los casos, excesivamente corto. Una prueba más prolongada brinda datos que definen con más precisión la pendiente y la posición de la recta correspondiente.

La fórmula (6) muestra que para un pozo determinado, si t es constante, el abatimiento es directamente proporcional al caudal de bombeo. La Fig. 77 indica que el abatimiento en el pozo de observación fue de 0.76 m. después de los 120 minutos, estando el pozo de bombeo descargando a razón de 113.2 m³/hora. Si el caudal fuese del doble, o sea, 226.4 m³/hora, el abatimiento en el pozo de observación después de 120 minutos sería también del doble, o lo que es igual, de 1.52 m. De la misma manera, con un valor de Q = 339.6 m³/hora, el abatimiento sería de 2.28 m.

La fórmula (7) nos muestra que en un acuífero dado el valor de Δs es directamente proporcional a la razón de bombeo. La prueba indica que Δs = 0.39 para un valor Q = 113.2 m³/h. Si Q fuese igual a 226.4 m³/h., Δs vendría a ser dos veces mayor, o lo que es lo mismo, igual a 0.794 m.

Se puede hacer un buen uso de estas dos relaciones. Aplicándolas a uno o más pozos de observación, se tendrá un medio para predecir correctamente el abatimiento en éstos para caudales de bombeo diferentes al que se empleó en la prueba. Aplicándolas a los datos suministrados por el pozo de bombeo, proporcionan una manera racional de efectuar cálculos que revelen su comportamiento, a condición desde luego, de que el pozo sea eficiente y que el espesor saturado del acuífero no se vea grandemente reducido por caudales mayores de bombeo.

La explicación y ejemplo anteriores del empleo de la fórmula de Theis en régimen de no equilibrio, y la fórmula modificada de Jacob, concuerdan con las hipótesis básicas utilizadas para la deducción de esas expresiones matemáticas. En este momento, resulta conveniente recapitular sobre varias de estas suposiciones y verificar algunas de sus divergencias relativas a la relación tiempo – abatimiento. Los acuíferos reales no se ajustan completamente a las condiciones que hemos supuesto, de manera pues, que sus límites de aplicación deben analizarse en aquellos casos en que las diferencias sean significativas.

La suposición de que el acuífero no recibe recarga alguna durante el periodo de bombeo, es una de las premisas fundamentales en que se basan las ecuaciones de no equilibrio. Lo anterior quiere decir que se supone que toda el agua descargada por el pozo es obtenida del almacenamiento del acuífero. El hecho de que el abatimiento aumenta y de que el cono de depresión se expande conforme continúa el bombeo, es una evidencia de la condición anterior. Este es el concepto fundamental que hace posible calcular la transmisividad mediante los datos de tiempo y abatimiento y con el empleo de la fórmula (7).

La suposición de que no existe recarga alguna durante el período de bombeo, permite también extender la pendiente inicial de la recta de tiempo – abatimiento, para la predicción de abatimientos futuros.

Sin embargo, se sabe que la mayoría de las formaciones son reabastecidas o recargadas. Los registros efectuados en pozos de observación, durante largos periodos, por el Servicio Geológico de los Estados Undios, por entidades estatales o por otros organismos similares que recopilan

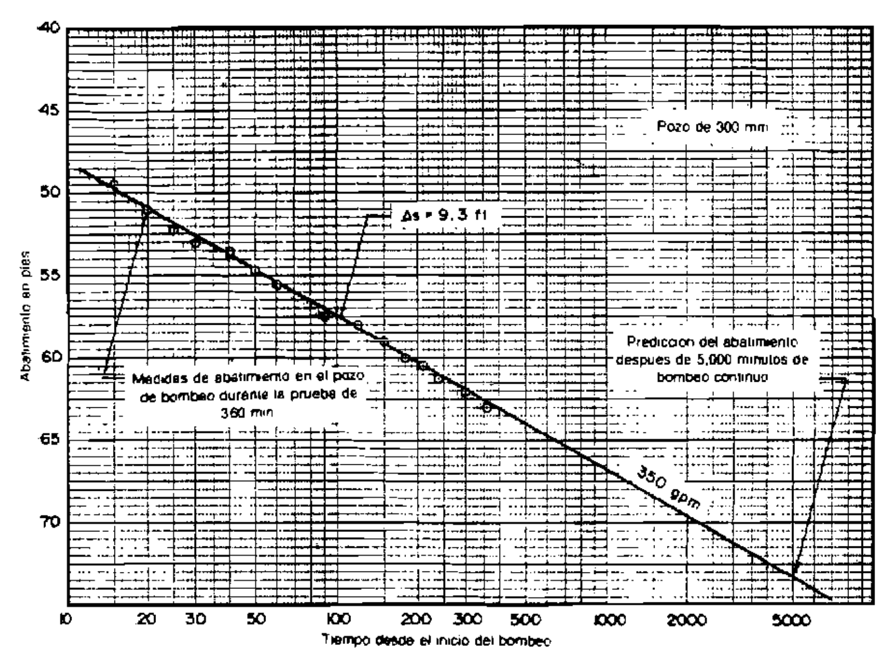


Fig. 78: El gráfico de tiempo – abatimiento de un pozo bombeado, puede extenderse para predecir el abatimiento que tendrá lugar dentro de un período de tiempo mayor que el de la prueba misma.

estos datos en varias partes del mundo, demuestran que la mayoría de las formaciones acuíferas reciben recarga contínua o intermitente.

Cuando la recarga es intermitente, el acuífero puede definitivamente comportarse, durante ciertas épocas del año, como si aquélla no tuviese lugar. Este período de ausencia de recarga puede durar hasta 30, 60 ó 90 días y a veces es mayor. De modo pues, que las gráficas de tiempo – abatimiento, tales como las que se han descrito aquí, podrían ser las representativas del comportamiento del pozo durante los períodos en que no hay recarga.

Si se realiza cuidadosamente una prueba de bombeo, existiendo una recarga que alimente al acuífero en cantidad apreciable, el gráfico de tiempo – abatimiento reflejará esa recarga.

La Fig. 78 muestra un gráfico de tiempo – abatimiento obtenido de un pozo que funciona en condiciones de ausencia de recarga. El pozo fue bombeado a un caudal constante de 79.5 m³/hora y las medidas del abatimiento se obtuvieron a intervalos de tiempo durante los 360 minutos del bombeo. Los puntos trasladados al papel semilogarítmico definen una recta con una pendiente, o valor de Δs de 2.84 m. Como hemos visto ya, el abatimiento futuro en este pozo, para un período contínuo de bombeo y a 79.5 m³/h., puede estimarse fácilmente mediante la prolongación de la recta. El abatimiento correspondiente a 5,000 minutos de bombeo contínuo sería de 22.3 m.

El nivel dinámico que se espera y la posición correcta de la bomba, necesaria para obtener una sumergencia adecuada de la misma, se determinan fácilmente por este método de utilizar el diagrama. Se puede aplicar un factor de seguridad al nivel calculado de bombeo, para tomar en cuenta las variaciones en el comportamiento del pozo, que resulten de incrustaciones posibles o de los efectos de interferencia que pudieran producir otros pozos que se construyesen en las cercanías en un futuro.

Bombeo contínuo significa operar un pozo durante las 24 horas del día, sin darle oportunidad a que su nivel recupere. Un pozo que funcione apenas durante una parte de las 24 horas diarias, no manifiesta el mismo abatimiento acumulado después de transcurridos 7, 30 ó 90 días de servicio, como lo podría indicar un diagrama similar al de la Fig. 78. Obviamente, un pozo que se bombeara, siguiendo un ciclo de 12 horas de bombeo y 12 horas de descanso, recibe el beneficio de la recuperación del nivel del agua durante ese período de 12 horas de reposo.

Por otra parte, a no ser que alguna recarga tenga lugar mientras la bomba está en reposo, el nivel del agua no se recuperará totalmente hasta alcanzar el nivel estático original. Cada vez que el bombeo empieza de nuevo, el descenso parte de un nuevo nivel ligeramente inferior al que existía en el período de bombeo anterior.

En la ausencia de recarga, el abatimiento al final de 90 días de bombeo intermitente puede ser más o menos igual al abatimiento que existiría después de 45 días de extracción contínua de agua. Esto equivale a una regla empírica; en ningún momento representa una relación matemática exacta existente entre los dos períodos utilizados en el ejemplo.

Cuando la recarga del acuífero, dentro de la zona de influencia del pozo de bombeo, es igual a la descarga de éste, el abatimiento se estabiliza. Ya no tendrá lugar ningún abatimiento adicional de los niveles del agua aunque el bombeo prosiga a razón constante. Por lo tanto, la recta del gráfico de tiempo – abatimiento, se vuelve horizontal, tal como en la Fig. 79.

La primera parte de la recta de la Fig. 79 indica que el cono de depresión aumentó

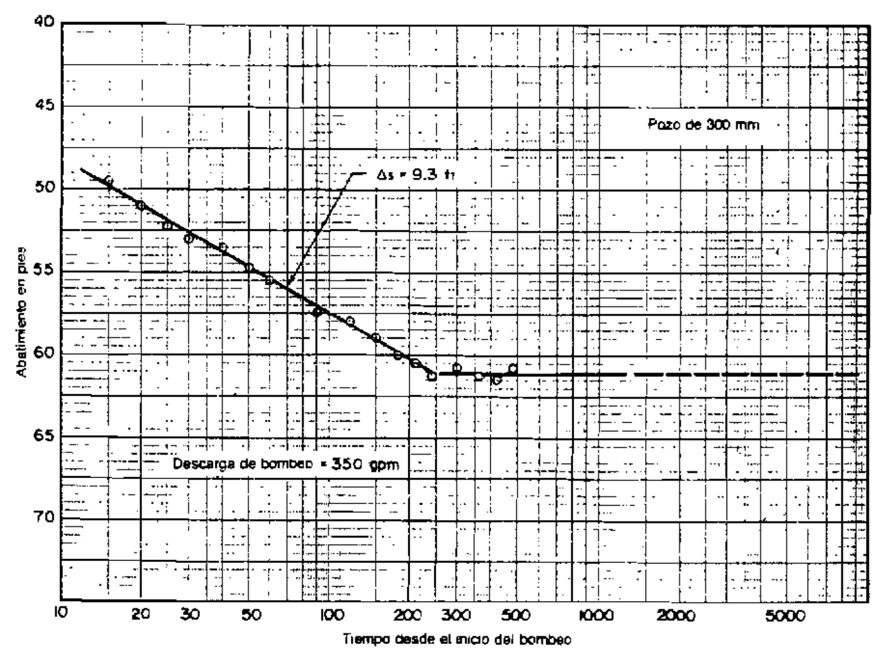


Fig. 79: Cuando tiene lugar recarga del acuífero dentro de la zona de influencia del pozo, la pendiente de la curva de tiempo – abatimiento se aplana. La rama horizontal indica que la recarga es igual a la descarga del pozo, y que se ha alcanzado el equilibrio después de 240 minutos de bombeo.

contínuamente durante los primeros 240 minutos de bombeo, hasta que el área de influencia del pozo interceptó una fuente de recarga. La intensidad de esta recarga fue suficiente para igualar el caudal de bombeo, dando por resultado el equilibrio de los niveles del agua dentro del área de influencia. La segunda rama de la línea de la Fig. 79 representa las condiciones de equilibrio.

A veces sucede que la recarga interceptada por el cono de depresión es de magnitud menor que el caudal de bombeo del pozo. Aunque esto influye en la pendiente de la recta de tiempos – abatimientos, la segunda rama podría no ser horizontal. La pendiente se torna más pequeña que la del tramo inicial, indicando esto que el cono de depresión se está expandiendo más lentamente que durante la primera parte del período de bombeo.

Un futuro abatimiento del pozo podrá predecirse esta vez prolongando la recta del segundo tramo de la gráfica, hasta el punto correspondiente al período supuesto de bombeo contínuo.

Cuando alguna condición especial produce un cambio en la pendiente de la recta de abatimientos durante el transcurso de la prueba de bombeo, el abatimiento futuro para cualquier período de bombeo contínuo sólo se puede determinar gráficamente, mediante el procedimiento que se ha descrito. Si la pendiente no varía, el abatimiento futuro puede calcularse mediante la fórmula de Theis o puede encontrarse por el método gráfico. Sin embargo, si la pendiente cambia, la fórmula de Theis no podrá aplicarse a ningún tiempo mayor de aquél en que ocurrió el cambio.

Cabe destacar de paso, que el cálculo de la transmisividad de la formación acuífera debe efectuarse utilizando el valor de Δs correspondiente al primer tramo de la recta de tiempo – abatimiento. Más allá del punto en que tiene lugar el cambio de inclinación, cualquier valor numérico de la pendiente de la segunda rama de la recta, no tiene significado en el análisis de los datos de la prueba. No debe intentarse utilizar un valor tal, ni en la fórmula de no equilibrio de Theis, ni en las fórmulas modificadas del mismo régimen.

Recarga Proveniente de un Río

El establecimiento de las condiciones de equilibrio que estabilizan el cono de depresión en torno a un pozo que se está bombeando, puede ocurrir de diferentes maneras. Una de éstas tiene lugar cuando el acuífero es recargado por un río o por un lago. La Fig. 80 ilustra tal situación, cuando se ha alcanzado el equilibrio.

Durante la parte inicial del período de bombeo, el cono de depresión no se extiende hasta el río y no se manifiesta ningún efecto de recarga. El nivel dinámico en el pozo sigue descendiendo conforme transcurre el período de bombeo, lo que se muestra en la primera parte del gráfico de la Fig. 79.

Cuando el cono de depresión se extiende por debajo de una parte del lecho del río, se desarrolla un gradiente hidráulico entre el agua subterránea en el acuífero y el agua del río. De esta manera, percola agua del río hacia abajo a través del lecho permeable de éste y bajo la influencia del gradiente hidráulico, siempre que exista una conexión hidráulica con el acuífero. De esta manera pues, el río recarga al acuífero a una razón que aumenta conforme el cono de depresión se extiende.

Cuando la razón de recarga al acuífero llega a ser igual al caudal de descarga del pozo, tanto el cono de depresión como el nivel de bombeo, se estabilizan. La parte horizontal del gráfico de la Fig. 79, corresponde a esta condición y a la situación mostrada en la Fig. 80.

Mediante la extensión del gráfico de la Fig. 79, es posible predecir la magnitud del abatimiento después de transcurridos 5,000 minutos de bombeo contínuo, la cual sería de

18.6 m. La recarga del acuífero, en este caso, reduce el abatimiento en 3.7 m. del valor indicado en la Fig. 78 y para el mismo período de bombeo ininterrumpido.

Recarga Originada en Infiltración Vertical

Otra situación que conduce al establecimiento de condiciones de equilibrio, tiene lugar cuando existe recarga vertical a través de toda el área de influencia alrededor del pozo de bombeo. Un ejemplo de lo anterior es el caso de un pozo que capta agua de un acuífero freático en el cual todo el material de la zona de aereación, desde la superficie del terreno hasta el nivel de saturación, está constituído por arena permeable. Supongamos que conforme el cono de depresión se ensancha, se produce infiltración como consecuencia de la lluvia que cae dentro del círculo de influencia del pozo. Cuando la cantidad de agua que percola hasta el nivel de saturación y dentro del círculo de influencia es igual en magnitud a la descarga del pozo, el cono de depresión cesa de extenderse y los niveles de bombeo dentro del pozo y del acuífero se estabilizan.

Quizá el tipo más común de recarga que ocasiona condiciones de equilibrio, es el de la percolación vertical de agua proveniente de estratos de material saturado que yacen sobre un acuífero interceptado por un pozo de producción. Los materiales de los estratos superiores de la zona de saturación tienen a menudo una permeabilidad considerablemente menor que el material más profundo en que el pozo termina. La diferencia de permeabilidad entre los estratos superior e inferior puede ser tal que el material superior no se considera como parte del acuífero mismo. Cuando el área del círculo de influencia llega a cubrir decenas de millares de metros cuandrados, la percolación total vertical que proviene del material superior, aunque éste sea de permeabilidad reducida, es capaz de igualar a la descarga del pozo y equilibrar los niveles de bombeo. Esta situación también puede ocurrir en formaciones lenticulares en donde solamente la parte inferior del espesor total puede que se halle enrejillada.

Efectos de la Superficie Freática Inclinada

Dentro de un acuífero, el flujo subterráneo anterior y posterior al pozo produce otra condición que puede causar la estabilización de los niveles de bombeo. Tal como se explicó en el Capítulo 2, el agua subterránea se desplaza debido al gradiente hidráulico

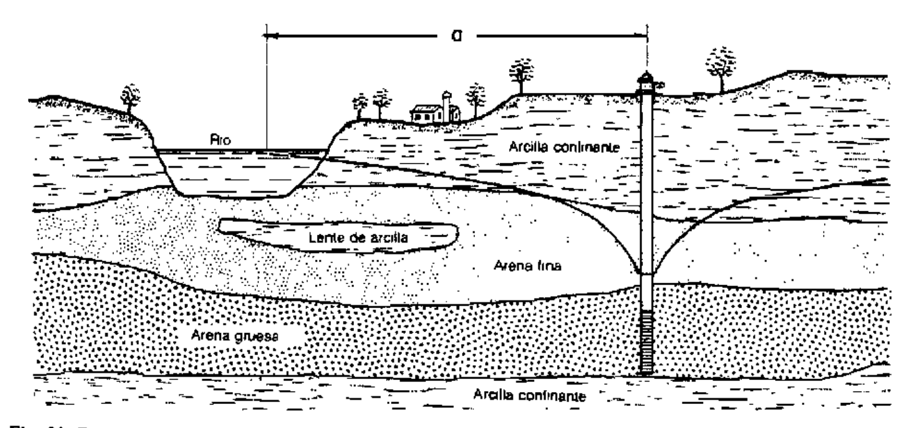


Fig. 80: El cono de depresión, al extenderse por debajo del lecho del río, crea un gradiente hidráulico entre el acuífero y el río. Lo anterior da como resultado el que se induzca una recarga desde el río hacia el acuífero.

que se desarrolla entre las áreas de recarga y de descarga. El gradiente está representado por la pendiente de la superficie freática o piezométrica. La mayor parte de las pendientes naturales de las superficies freática o piezométrica, son relativamente planas y no afectan sustancialmente las curvas de comportamiento de los pozos. Sin embargo, una pendiente relativamente empinada hace que el cono de depresión alrededor del pozo, se distorsione. En lugar de ser circular, el área de influencia se torna elíptica. En mayor grado, el agua que se está bombeando proviene de la región aguas arriba en vez de fluir de todas direcciones. En efecto, la descarga del pozo sustrae una parte del flujo natural que, de otro modo, pasaría de lado.

Efecto de la Recarga en el Abatimiento

La discusión del efecto de la recarga en la forma del gráfico de tiempo – abatimiento, se ha limitado únicamente al pozo de bombeo, Fig. 79. Debe quedar claro que las observaciones realizadas en un pozo de observación permitirían obtener un gráfico similar, exceptuando el hecho de que el tiempo al cual tiene lugar el cambio dependiente, sería diferente y dependería de la distancia relativa a la fuente de recarga.

Para un pozo de observación situado entre el río y el pozo de bombeo, tal como se muestra en la Fig. 80, el aplanamiento del gráfico tendría lugar en un tiempo de alrededor de 240 minutos. Si el pozo de observación estuviese situado en el lado opuesto del de bombeo, alejándose del río, el cambio de pendiente sucedería algún tiempo después de los 240 minutos de bombeo. Basándose en esta relación, Ferris[8] ha descrito la utilización de pozos imaginarios para estimar la distancia a la fuente de recarga.

Los datos que se obtienen de los pozos de observación son por lo general más confiables y precisos que los que se obtienen en el pozo de bombeo, de modo que los gráficos de tiempo — abatimiento obtenidos de los pozos de observación, son preferibles para revelar el comportamiento del acuífero.

Cuando se desea calcular la transmisividad, T, de la formación acuífera, debe utilizarse el valor de Δs correspondiente a la primera parte del gráfico de tiempo – abatimiento. En teoría, ambos gráficos, el del pozo de bombeo y el del pozo de observación, deben mostrar el mismo valor de Δs.

Suponiendo que el valor de Δs obtenido de los diagramas de tiempo – abatimiento de un pozo de bombeo y de otro de observación sea de 2.84 m., según Fig. 79, la transmisividad de la formación acuífera tendrá un valor de:

$$T = 0.183 \times 79.5/2.84 = 5.13 \text{ m}^3/\text{hora/m}.$$

Resulta evidente de la discusión anterior, que las frecuentes medidas de abatimiento al comienzo de una prueba de bombeo de caudal constante, son extremadamente importantes. Deben obtenerse suficientes datos idóneos durante la primera fase de la prueba, que reflejen claramente tanto el comportamiento del pozo como el del acuífero, antes de que los efectos de recarga u otras influencias externas, se manifiesten e invaliden la teoría básica de no equilibrio.

Resulta asimismo interesante saber que el aplanamiento de la pendiente del gráfico tiempo – abatimiento, puede también sugerir un cambio en la transmisividad del acuífero. Si el cono de depresión se expande hasta alcanzar una región del acuífero, que sea de mayor espesor o más permeable, su velocidad de expansión disminuirá. Lo anterior se manifiesta como una reducción de la pendiente del gráfico de tiempo – abatimiento. Si existe una considerable variación en el espesor del acuífero y de su permeabilidad, se violan dos de las suposiciones de Theis. La curva de tiempo-abatimiento deberá reflejar esta desviación de las condiciones ideales.

Barreras Impermeables

En verdad muy pocos acuíferos se ajustan a la premisa básica de extensión ilimitada en todas las direcciones desde el pozo de bombeo. En muchos lugares, barreras definidas, tanto geológicas como hidráulicas, limitan los acuíferos, reduciéndolos a áreas que van desde unos pocos hasta varios kilómetros cuadrados. Esto es especialmente cierto en aquellas regiones que han sufrido glaciaciones.

Un barrera impermeable afecta el gráfico de tiempo-abatimiento, de una manera totalmente opuesta a como lo hace el efecto de recarga al acuífero. La barrera hace que la pendiente del gráfico se empine en vez de suavizarse. El hecho anterior se comprende fácilmente, si consideramos cómo se alimenta el pozo, del agua contenida en el almacenamiento del acuífero.

Según las suposiciones básicas, el agua fluye en igual forma de todas las direcciones hacia el pozo. Cuando el cono de depresión, en proceso de expansión, tropieza con una barrera impermeable situada a un lado del pozo de bombeo, no se puede extender más en aquella dirección, y por lo tanto, no recibe más agua de esta región. Consecuentemente, el cono deberá expandirse y profundizarse más rápidamente en todas las direcciones restantes, para mantener la descarga del pozo. El efecto que se manifiesta en el gráfico semilogarítmico de tiempo-abatimiento, es el de una pendiente más empinada, tal como lo muestra la Fig. 81.

Un pozo de observación que se halle situado lo más cercano a la barrera, mostrará evidencia del efecto de ésta más pronto que lo que lo haría otro pozo de observación emplazado más lejos. La distancia a la barrera puede estimarse por el método de los pozos imaginarios, de manera análoga a la

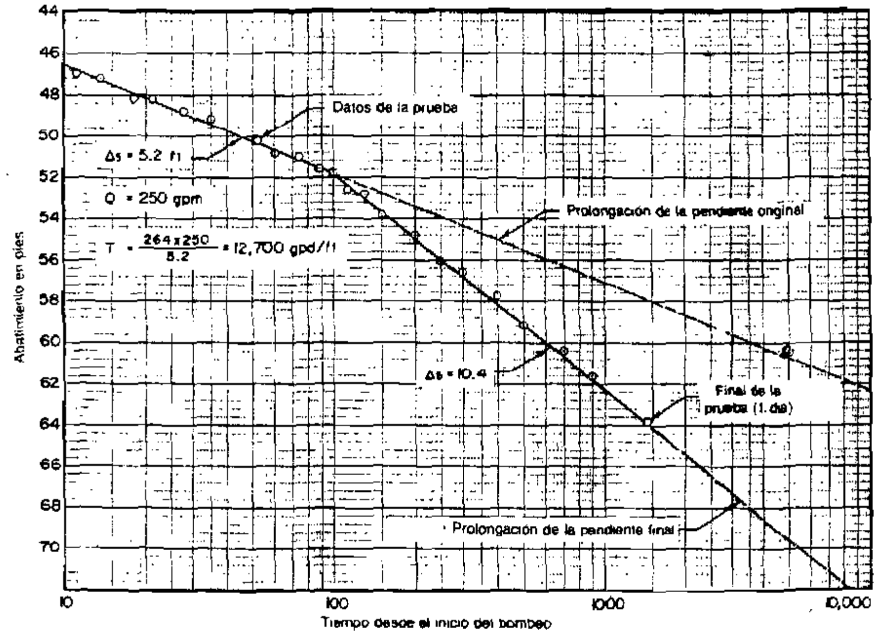


Fig. 81: El empinamiento de la pendiente del gráfico semilogarítmico de tiempo – abatimiento, indica la presencia de un acuífero limitado. El cono de depresión expansión, interceptó una o más barreras impermeables en el tiempo coincidente con el cambio de pendiente.

que se usa para localizar una fuente de recarga.[8]

Si la transmisividad del acuífero es considerablemente menor a alguna distancia del pozo de bombeo, la pendiente del gráfico de tiempo-abatimiento puede empinarse conforme el cono se extiende hacia esa región.

Debe tenerse gran cuidado al analizar los datos de una prueba de acuífero, cuando se sospeche la presencia de barreras o fuentes de recarga, cercanas. Los coeficientes de acuífero deben calcularse con base en los datos de la fase inicial de la prueba, si los efectos de barrera son evidentes. En ningún caso los cálculos deberán efectuarse partiendo de la pendiente de una parte cualquiera de la recta de tiempo-abatimiento, que ya refleje los efectos de la barrera. Cuando se desea pronosticar los niveles del agua después de transcurridos períodos mayores de bombeo contínuo, se deberá utilizar la pendiente dada por la última parte de la recta.

Cabe hacer notar la razón que motiva la sugerencia anteriormente dada, de que las pruebas de bombeo deben extenderse por lo menos un día en los acuíferos artesianos y por lo menos tres días en los freáticos. La Fig. 81 muestra evidencia de efectos de barrera 100 minutos después de haber comenzado el bombeo. Si la prueba se hubiese realizado durante sólo 100 minutos, esos efectos nunca se habrían manifestado. Extendiendo la pendiente inicial, en este caso se obtendría un abatimiento de 18.9 m. a los 7 días (10.000 minutos) de bombeo a razón de 56.6 m³/hora, en tanto que la estimación correcta del abatimiento futuro es de 21.9 m. como se obtendría al extender la segunda rama de la gráfica.

En un acuífero artesiano, el crecimiento del cono de depresión durante un período de bombeo de 24 horas, es lo suficientemente extenso como para interceptar barreras que podrían afectar apreciablemente las predicciones de abatimiento con base en el gráfico semilogarítmico de tiempo-abatimiento. En un acuífero freático, el cono de depresión se expande en forma más lenta, de modo que se requiere un mayor período de bombeo, para poner en evidencia las barreras que pudieren existir.

Diagrama de Distancia-Abatimiento

Aplicando el segundo principio descrito en la página 23, se puede construir un diagrama semilogarítmico de distancia-abatimiento. Se necesita tomar medidas simultáneas del abatimiento en por lo menos tres pozos de observación separados, cada uno a diferente distancia del pozo de bombeo, con el objeto de construir un gráfico preciso de distancia-abatimiento.

Si los valores anteriores se plotean en papel de gráficos ordinario, tal como se ha hecho en la Fig. 82, se obtiene la tan conocida traza del cono de depresión en las cercanías del pozo de bombeo. Esta es similar a las curvas de las Figs. 67, 70, 71 y 80.

Si los abatimientos determinados en los mismos tres pozos se ubican en un diagrama semilogarítmico, la curva de abatimiento se convierte en una línea recta tal como se muestra en la Fig. 83. La escala vertical representa el abatimiento; la horizontal, el logaritmo de las distancias desde el pozo de bombeo. Los puntos que representan el abatimiento, en pozos de observación sumamente alejados, caerán un poco por debajo de la línea recta como lo indica la Fig. 83, puesto que a cierta distancia del pozo de bombeo, el valor de "u" es mayor que 0.05 Cuando "u" es mayor que 0.05, la relación rectilínea entre s y $\log r$, deja de ser estrictamente cierta.

El trazado semilogarítmico del cono de depresión, o sea, el diagrama de distancia – abatimiento, simplifica las aplicaciones de la relación existente entre la distancia y el abatimiento. La línea recta puede extenderse hacia la derecha hasta cualquier distancia que se desee, para así determinar el efecto

ejercido por la extracción en un punto situado a cierta distancia del pozo de bombeo. A modo de ejemplo, la Fig. 83 nos muestra que cuando el pozo de prueba se bombeo a 45.4 m³/hora durante 500 minutos, debió haber producido un abatimiento de 0.65 m. en otro pozo situado a 100 m. más lejos.

Mediante una sencilla transformación, la fórmula (6) permite calcular la transmisividad mediante el diagrama de distancia – abatimiento. La pendiente de la línea recta dada por éste, se utiliza de manera análoga a la del diagrama de tiempo-abatimiento, tal como ya se explicó anteriormente. En este caso, la fórmula es la siguiente:

$$T = 0.366 \quad Q \,/\, \Delta s \qquad (8)$$

expresión en la cual:

T = coeficiente de transmisividad, en m³/hora/ metro.

Q = caudal de bombeo, en m³/hora

Δs = ("delta s") = pendiente de la recta dada por el gráfico de distancia-abatimiento, la cual se expresa como el incremento de abatimiento que tiene lugar entre dos valores de la distancia indicada en el gráfico semilogarítmico, cuya relación sea de 10. (un ciclo logarítmico)

En el caso del ejemplo mostrado en la Fig. 83, tendremos:

$$T = 0.366 \times 45.4 \,/\, 3.20 = 5.20 \text{ m}^3/\text{h/m}.$$

El coeficiente de almacenamiento también puede obtenerse del mismo diagrama de distancia-abatimiento, utilizando la siguiente fórmula derivada de la expresión (6):

$$S = 2.25 \; T\, t/r^2_0 \qquad (8a)$$

en la cual:

S = coeficiente de almacenamiento

T = coeficiente de transmisividad, en m³/h/m.

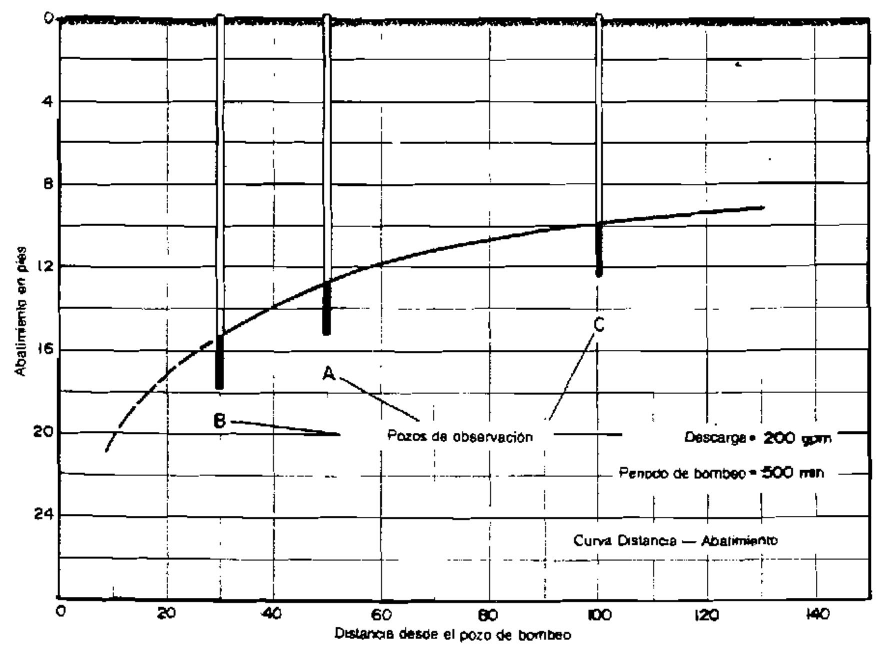


Fig. 82: Al plotearse los abatimientos de tres pozos de observación, queda definida parte del cono de depresión.

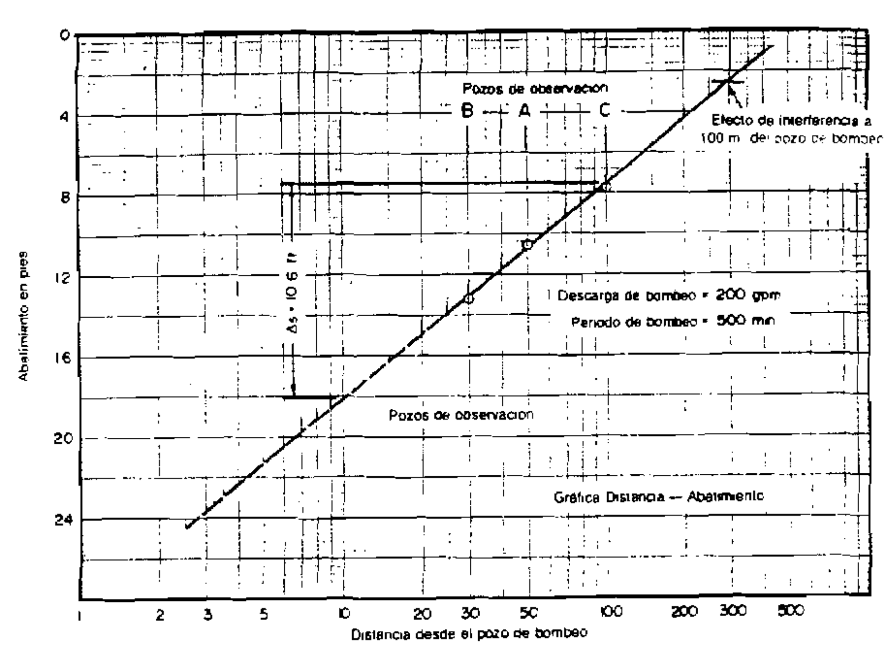


Fig. 83: La traza del cono de depresión, llevada a un grafico semilogarítmico, define una línea recta. El abatimiento en cada pozo de observación fue medido a los 500 minutos después de haberse iniciado el bombeo.

t = tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo, en horas.

r_0 = Distancia a la que la prolongación de la recta del diagrama intercepta el eje de abatimiento nulo, en metros.

De la Fig. 83, se obtiene el valor de r_0 = 155 m.; T = 5.20 m³/h/m. t = 500/60 = 8.34 horas.

En esta forma:

$$S = 2.25 \times 5.20 \times 8.34 / (155)^2$$
$$= 4.07 \times 10^{-3}$$

Se observa entonces, que los coeficientes de acuífero se pueden calcular mediante dos relaciones que se derivan de una prueba de acuífero, a saber:

1. Razón de descenso, en cualquier tiempo, del nivel de agua dentro del cono de depresión, conocido como "diagrama de tiempo-abatimiento".

2. Forma y posición de la traza del cono de depresión en un instante dado, conocida como "diagrama de distancia-abatimiento.

Estos cálculos son independientes entre sí, de modo que el resultado obtenido mediante el uso de una de las fórmulas, puede utilizarse como verificación del que se obtenga con la otra.

Otros Usos de los Gráficos de Distancia-Abatimiento

Deberá notarse que la constante numérica de la fórmula (8) es exactamente el doble de la de la fórmula (7). Esto se debe a que "r" aparece en la fórmula (6) elevada a la primera potencia, en tanto que "r" se halla elevada al cuadrado o sea a la segunda potencia.

Puesto que el log $r2$ equivale a 2 log r, se deduce que el valor de Δs, en el gráfico de distancia-abatimiento, debe ser del doble que la magnitud de Δs en el gráfico de tiempo-abatimiento. Este cociente de 2, de las pendientes de ambas líneas rectas en un acuífero determinado y a una razón dada de

bombeo, constituye una relación constante, o fija.

Ello significa que una vez que se haya determinado el valor de Δs mediante el uso de un diagrama de tiempo-abatimiento, de inmediato conoceremos la pendiente del gráfico de distancia-abatimiento, la que, si el pozo se está bombeando al mismo caudal, tendrá un valor del doble. Lo anterior nos permite la construcción del gráfico de distancia-abatimiento a partir de otro de tiempo-abatimiento, y mediante mediciones realizadas en un solo pozo de observación.

Sin embargo, cuando sólo se utiliza un pozo de observación, no se pueden efectuar cálculos independientes del comportamiento del acuífero.

El ejemplo siguiente nos ilustra la manera de construir los gráficos de tiempo-abatimiento. La Fig. 84 muestra un gráfico semilogarítmico de tiempo-abatimiento, trazado con los datos obtenidos del pozo de observación A, cuya distancia al pozo de bombeo es de 15 m., tal como se observa en las dos ilustraciones anteriores. El valor de Δs que se obtiene del gráfico de tiempo-abatimiento, es de 1.60 m., que corresponde exactamente a la mitad del valor de Δs que se obtiene en el gráfico distancia-abatimiento de la Fig. 83.

Se desea construir un gráfico de distancia-abatimiento para un tiempo transcurrido de bombeo de 300 minutos; observando primeramente en la Fig. 84, que el abatimiento en el pozo A a este tiempo, es de 2.90 metros, se traslada enseguida esta medida hasta un punto correspondiente a una distancia de 15 m., en un nuevo diagrama, tal como se muestra en la Fig. 85. Luego, a través de ese punto, se traza una línea recta de pendiente igual a Δs = 2 x 1.60 = 3.20 m. En esta forma se obtiene un gráfico de distancia-abatimiento, que representa el cono de depresión después de transcurrir 300 minutos de bombeo contínuo y a razón de 45.4 m³/hora.

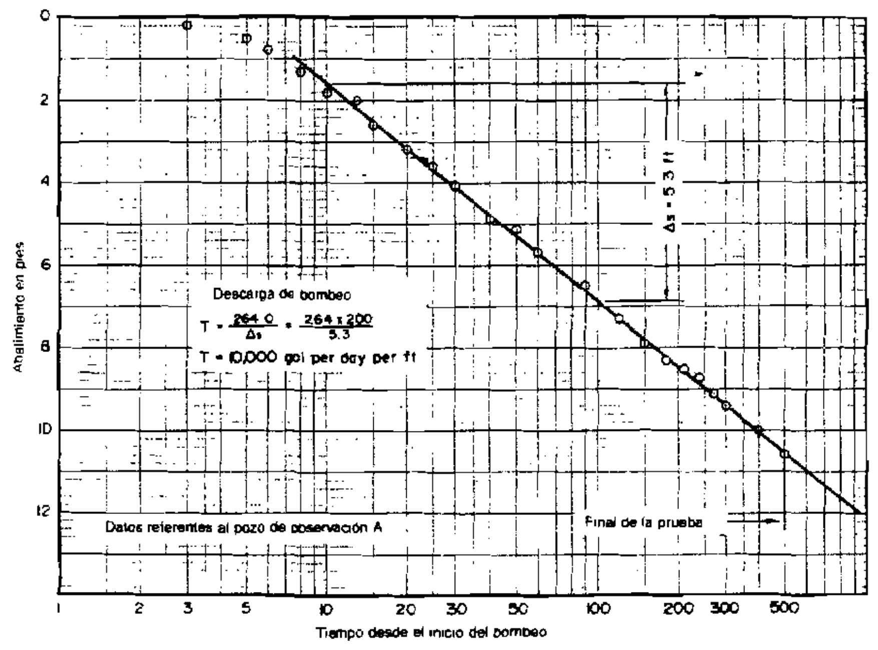


Fig. 84: Gráfico tiempo-abatimiento de un pozo testigo A, distante del pozo bombeado. Corresponde el gráfico a una descarga constante de 200 galones por minuto (45.4m³/hora).

Muy frecuentemente se desea conocer cuál sería el abatimiento para caudales de bombeo diferentes a aquél empleado en la prueba de bombeo. Los datos anteriores podrían necesitarse para calcular el efecto de interferencia ejercido por cierto pozo sobre otros, al bombearlo a diferentes caudales. Por ejemplo, se desearía saber cuál es la interferencia que podría manifestarse en un pozo situado a 100 m. de distancia de un pozo permanente, que iría ubicado en el mismo sitio del pozo de prueba, si se bombeara a 90.8 m³/hora.

La fórmula (8) indica que el valor de Δs varía en relación directa con el caudal de bombeo, Q. Por lo tanto, para una descarga de 90.8 m³/hora, la pendiente Δs del gráfico de distancia-abatimiento sería de 2 x 3.2, o sea, 6.4 m.

Mediante los datos mostrados en las Figs. 84 y 85, puede desarrollarse una familia de líneas rectas, en que cada una representa la relación existente entre la distancia y el abatimiento a diferentes caudales de bombeo. Para obtener lo anterior, se aplican dos relaciones proporcionadas por las fórmulas que hemos discutido anteriormente. La primera de éstas es la de que el abatimiento en cualquier punto fuera del pozo de bombeo, tal como A, varía en proporción directa al caudal. La segunda consiste en que el valor de Δs, o sea, la pendiente de la gráfica de distancia-abatimiento, también varía en proporción directa con la descarga.

Para ilustrar el procedimiento, se construirán gráficas de distancia-abatimiento para caudales de 22.7, 56.7 y 90.8 m³/hora. El primer paso consiste en determinar un punto definido a través del cual deben pasar los gráficos que se desean. Lo anterior se efectúa multiplicando el valor del abatimiento medido en el pozo de observación A, tomado ya sea de la Fig. 84 u 85, por la relación de caudales de bombeo. El abatimiento en el pozo de observación A

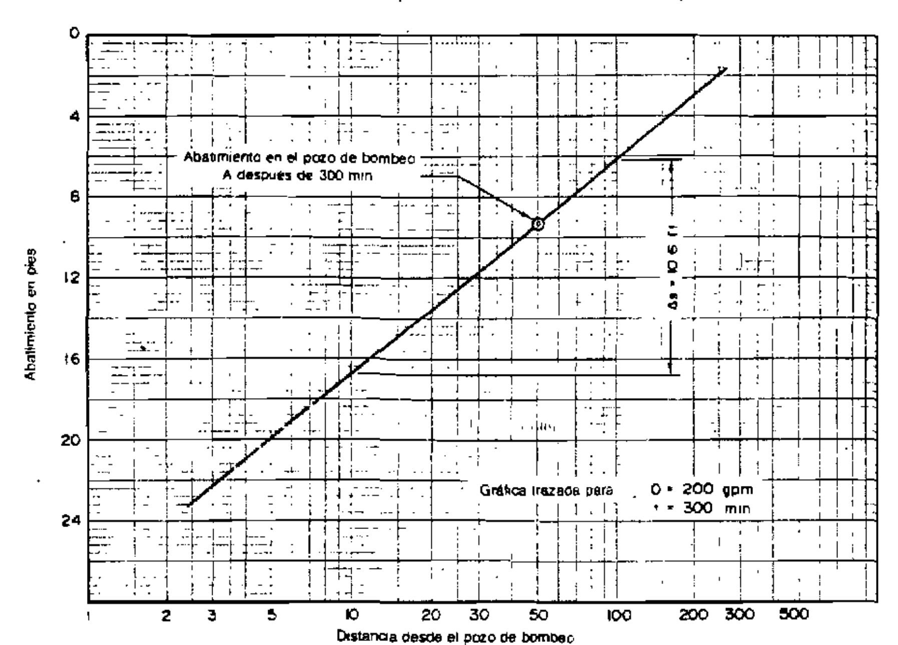


Fig. 85: Gráfico de distancia — abatimiento construido a partir de los datos de tiempo — abatimiento de la Fig. 84, y que representa la posición del cono de depresión, después de transcurrir 300 minutos de bombeo a caudal de 45.4 m³/hora.

y para una descarga de 22.7 m³/hora, deberá ser la mitad del que se produjo a un caudal de 45.4 m³/hora durante la prueba de bombeo. El abatimiento medido, para un caudal de 45.4 m³/hora, fue de 2.9 m., de manera pues que el abatimiento calculado para sólo 22.7 m³/hora, deberá ser de 1.45 m., siendo el mismo el período de bombeo. El valor anterior, llevado a un gráfico semilogarítmico (Fig. 86) y a una distancia de 15 m. del pozo de bombeo, constituye un punto definido del gráfico que se está construyendo y que representa la condición que prevalece a un caudal de 22.7 m³/h.

El paso siguiente consiste en el cálculo de la pendiente del gráfico de distancia-abatimiento para 22.7 m³/hora. Esto se hace multiplicando el valor de la pendiente mostrada en la Fig. 85, por las relaciones entre los caudales de bombeo.

El valor de Δs es de 3.20 m. cuando el caudal es de 45.4m³/h. El valor de Δs para una razón de bombeo de 22.7 m³/h., será de justamente la mitad, o sea, 1.60 m.

Con un abatimiento calculado de 1.45 m., a una distancia de 15 m. del pozo de bombeo, y con el valor calculado de la pendiente Δs, se puede ahora trazar la recta de distancia-abatimiento para un valor del caudal de 22.7 m³/hora. El procedimiento consiste en hacer pasar una línea recta, con una pendiente de 1.6 por ciclo logarítmico, a través del punto que representa 1.45 m. de abatimiento a 15 m. de distancia del pozo de bombeo, tal como lo indica la recta superior de la Fig. 86.

En la Tabla XVI se ofrecen los datos para el trazado de las otras rectas de la Fig. 86. Estos datos se han calculado de la manera descrita anteriormente.

Cada gráfico se construye ploteando un punto que represente el abatimiento a una distancia determinada del pozo del bombeo, en este caso 15 m., y trazando por este punto

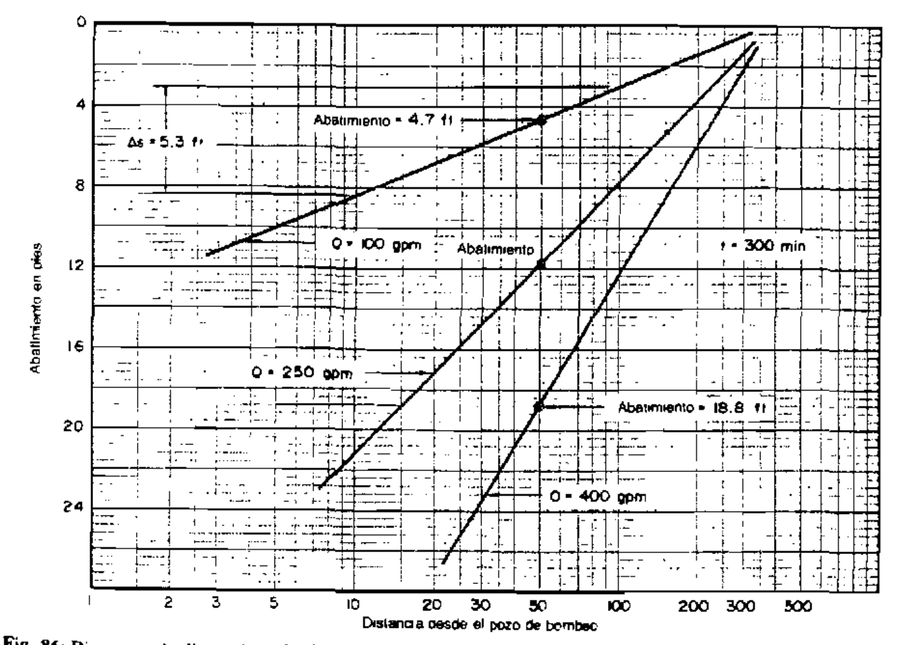


Fig. 86: Diagrama de distancia – abatimiento construído para varios caudales de bombeo, utilizando los datos básicos del diagrama de la Fig. 84. Cada recta representa las condiciones que existen a los 300 minutos de bombeo al caudal indicado.

Tabla XVI
Datos para Gráficos de Distancia-Abatimiento

Caudal de Bombeo m³/hora.	Abatimiento a distancia de 15 m. en metros	Valores de Δs en metros
22.7	1.45	1.60
45.4	2.90	3.20
56.7	3.63	4.00
90.8	5.80	6.40

una línea recta cuya pendiente Δs corresponda al valor calculado.

De la Fig. 86 podemos también obtener directamente la interferencia o abatimiento que se produce en otro pozo, distante 100 m. del sitio del pozo utilizado en el ejemplo anterior. Si el pozo de prueba se bombease a 90.8 m³/hora, el gráfico de distancia-abatimiento, trazado para este caudal, nos muestra que el nivel del agua en un punto situado a 100 m. más lejos, hubiese descendido 0.55 m. Así pues, el abatimiento total en otro pozo situado a 100 m., sería el causado por su propio bombeo, más el provocado por la influencia del primero. Al bombear el segundo pozo, éste a su vez produciría el mismo grado de interferencia en el primero, si ambos se bombeasen a 90.8 m³/hora.

De la misma manera pueden evaluarse los efectos de interferencia entre varios pozos separados a diferentes distancias. El efecto total ejercido sobre un pozo determinado, es igual a la suma de las influencias producidas por todos los otros pozos del grupo.

En la discusión anterior, los cálculos de la interferencia en el pozo han sido hechos para las condiciones que prevalecerían en el acuífero con un bombeo contínuo a lo largo de un período de 300 minutos. La Fig. 85 ha sido construída con esta base. El primer punto localizado en la curva, se tomó del gráfico de tiempo-abatimiento para el pozo de observación A y a 300 minutos después de haberse iniciado el bombeo.

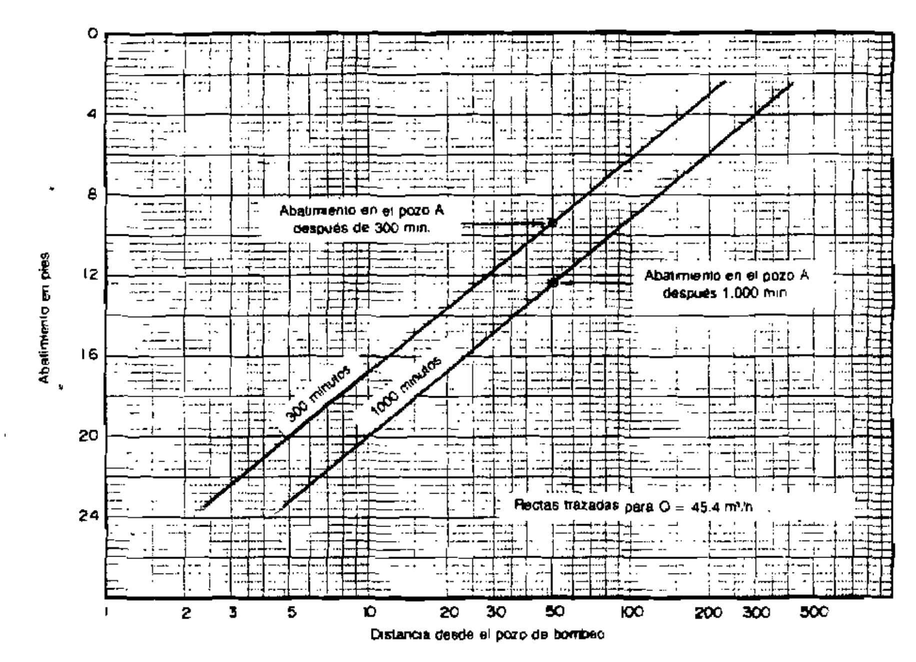


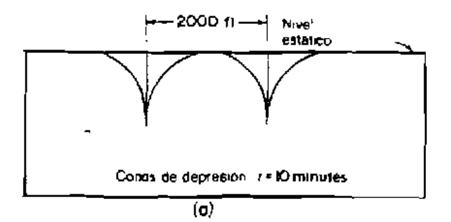
Fig. 87: Diagrama de distancia – abatimiento construído para mostrar las posiciones del cono de depresión después de transcurrir 300 minutos y 1000 minutos de bombeo, a una descarga constante de 45.4 m³/hora.

Puesto que la Fig. 86 se construyó con base en la Fig. 85, todos los gráficos de distancia-abatimiento de la Fig. 86, son a su vez válidos únicamente para un valor del tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo, de 300 minutos.

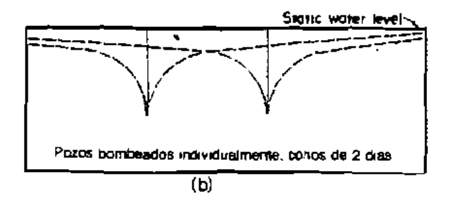
Si se desea obtener los valores de interferencia para periodos diferentes de bombeo contínuo, debemos partir de otro punto tomado de los datos originales. El abatimiento en el pozo de observación A, que tiene lugar después de 1.000 minutos de bombeo, de un valor de 3.75 m., y mostrado por la Fig. 84, podría utilizarse. El gráfico que muestra las condiciones prevalecientes después de 1.000 minutos de bombeo a razón de 45.4 m³/hora, es paralelo al correspondiente a un período de 300 minutos, tal como se muestra en la Fig. 87. Otro grupo de gráficos similar al que se muestra en la Fig. 86, se puede preparar con fundamento en aquéllos que se obtengan del gráfico de 1,000 minutos, de la Fig. 87.

Para obtener una clara idea de interferencia y de lo que ésta significa, en un campo de pozos en donde existen varios pozos de bombeo cuyos conos de influencia se traslapan, debe estudiarse cuidadosamente la Fig. 88. En la parte (a), se muestran los perfiles de dos pozos que se hallan distanciados a 600 m. y que han sido bombeados a un caudal de 113.2 m³/hora, durante 10 minutos. Obsérvese que al final de los 10 minutos, los conos de depresión aún no han llegado a encontrarse. En la parte (b), se muestra la extensión alcanzada por los conos de depresión después de dos días de bombeo contínuo. Si cualquiera de los dos pozos hubiese sido bombeado aisladamente, entonces los conos de depresión aparecerían, tal como se muestra mediante la línea interrumpida correspondiente al pozo que se estuviese bombeando. Sin embargo, cuando ambos pozos se bombean, el resultado neto sería como se puede apreciar en la parte (c), y que en realidad viene a ser la suma de los abatimientos producidos en cualquier punto de la zona de influencia, por el efecto combinado de ambos pozos.

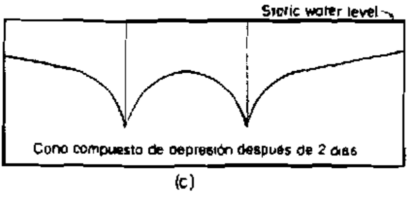
El gráfico de tiempo-abatimiento de cada uno de los pozos, mostrado en la Fig. 88, aparecería tal como se indica en la Fig. 89. El valor correcto de la transmisividad del acuífero sólo se podría obtener de la pendiente inicial de esta curva. La segunda pendiente, casi el doble de la anterior, ya muestra el efecto del otro pozo. El resultado neto que impone el segundo pozo, cuando es bombeado al mismo caudal, es matemáticamente equivalente al de la presencia de una barrera en la formación.



(a)



(b)



(c)

Condiciones supuestas
T = 50,000 gpd per ft   d = 12 inches
S = 5 x 10⁻⁴   Q = 500 gpm

Fig. 88: Cómo se manifiesta la interferencia entre pozos adyacentes que interceptan el mismo acuífero artesiano. El cono compuesto corresponde a ambos pozos los cuales se bombean simultáneamente y en las condiciones aceptadas.

En algunos casos, la eficiencia del pozo de bombeo puede estimarse mediante el gráfico de distancia-abatimiento. Para lograrlo, se extiende la línea recta que representa el perfil del cono de depresión, hasta mostrar el abatimiento que tiene lugar en la pared del pozo. Tal extensión se ha trazado en la Fig. 90.

Eficiencia del Pozo de Bombeo

La intersección de la extensión de la línea recta con el radio del pozo de bombeo, indica el abatimiento teórico en el caso de un pozo 100 por ciento eficiente. (El radio de un pozo acondicionado con filtro artificial de grava, se toma como igual al radio exterior del filtro). El resultado es estrictamente cierto sólo para un acuífero artesiano en que todo el espesor de éste se halla captado con una rejilla.

El abatimiento teórico en este ejemplo es de 8.0 m. El abatimiento real en el pozo tiene un valor de 8.90 m. La eficiencia del pozo se calcula entonces como 8.0/8.9, o sea, 90 por ciento.

En aquellos casos en que al operar el pozo se provoca una reducción considerable del espesor saturado del acuífero, esta circunstancia produce a su vez un abatimiento adicional que no se considera como ineficiencia del pozo. Esto sería cierto en los pozos de acuíferos freáticos. Antes de calcular la eficiencia en tales pozos, se debe aplicar un factor de corrección por la reducción en espesor saturado, el cual se toma de la Fig. 73.

Los factores que contribuyen a producir excesivo abatimiento en los pozos, pueden agruparse en dos clases. Un grupo incluye aquellos factores que dependen primordialmente de la manera de diseñar el pozo. El otro grupo se relaciona con la construcción de éste. A continuación se da un sumario de los factores de ambos grupos.

Factores de Diseño

1. El escoger una rejilla de pozo con una área abierta insuficiente, produce velocidades de acceso muy altas que dan por resultado pérdidas de entrada mayores que las normales.

2. Una distribución inadecuada de las aberturas de la rejilla, produce convergencia excesiva del flujo cerca de cada abertura individual. En algunos casos, esto ha producido abatimientos cuyo valor es del doble de los que deberían haber ocurrido. Los diagramas adjuntos, de la red de flujo alrededor de la rejilla, ilustran este caso.

3. Una longitud insuficiente de rejilla, lo que da por resultado una penetración parcial del acuífero, distorsiona el régimen de flujo por alguna distancia alrededor del pozo. En estas condiciones, el flujo hacia la rejilla contiene una componente vertical, como también la componente horizontal principal. Como la permeabilidad vertical es por lo general menor que la horizontal, tiene lugar una considerable pérdida de carga como resultado de la componente vertical de flujo mencionada.

Factores de Construcción

1. Como consecuencia de un inadecuado desarrollo del pozo, la permeabilidad de los materiales de la formación puede ser muy baja en los alrededores de la rejilla. Una rejilla con un porcentaje pequeño de aberturas, o que contenga una mala distribución de éstas, puede hacer muy difícil para el contratista de perforación, el desarrollo apropiado del pozo.

2. Como resultado de una mala colocación, la rejilla puede quedar frente a un intervalo que no corresponde al estrato acuífero más productivo.

A veces, y aunque ello dé por resultado un mayor abatimiento, se usa una longitud reducida de rejilla debido a otras consideraciones del diseño. La evaluación del efecto producido por penetración parcial de la sección de captación del pozo dentro del acuífero, se discute luego en este mismo capítulo. En el Capítulo 10, se analiza la elección de la longitud de la rejilla del pozo.

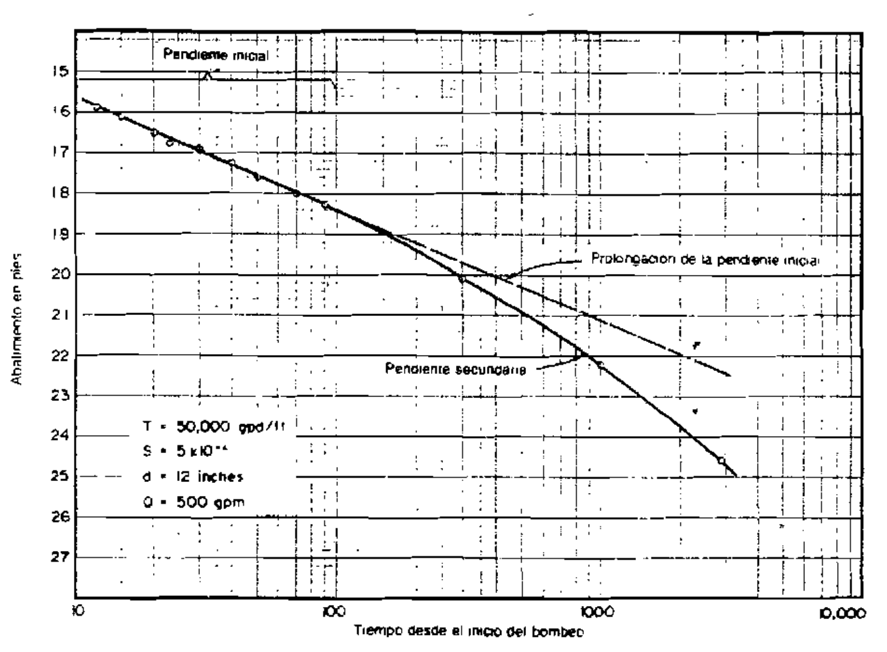


Fig. 89: Diagrama de tiempo – abatimiento correspondiente a cualquiera de los pozos de la Fig. 88, y que muestra la interferencia que empieza en el momento en que el cono de depresión se extiende hasta alcanzar al otro pozo.

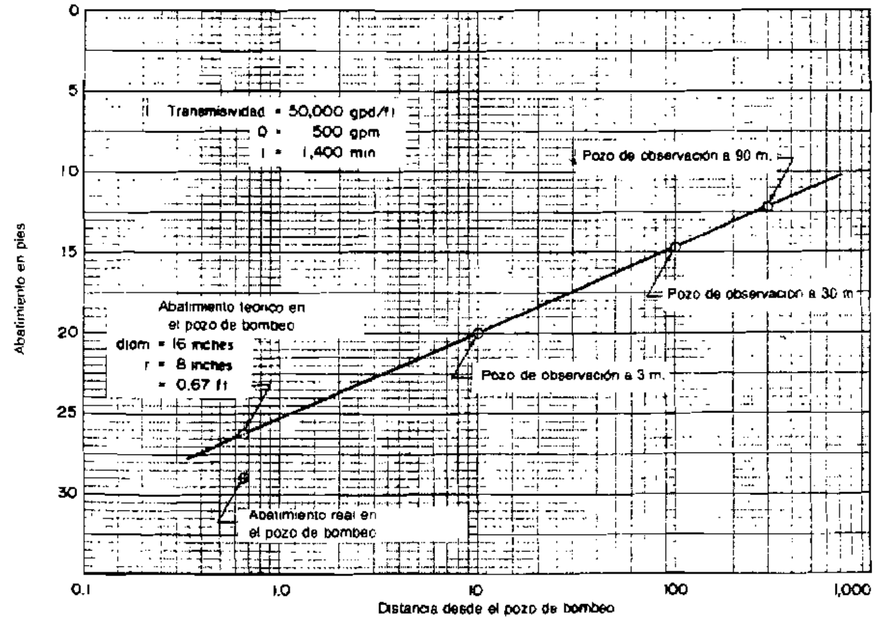
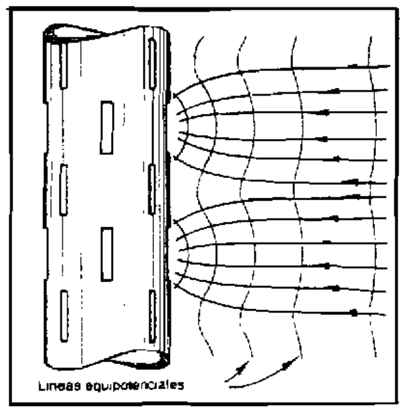
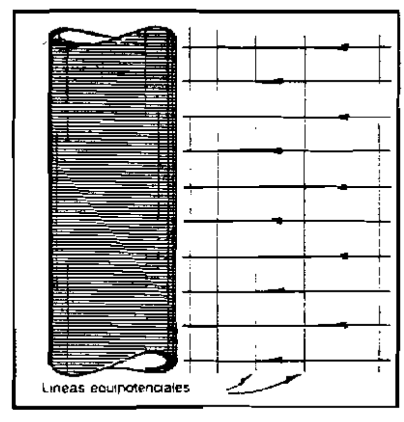
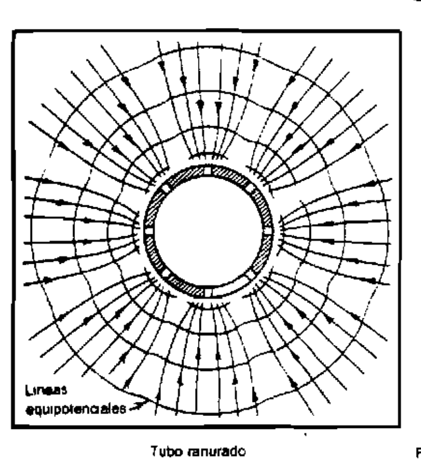


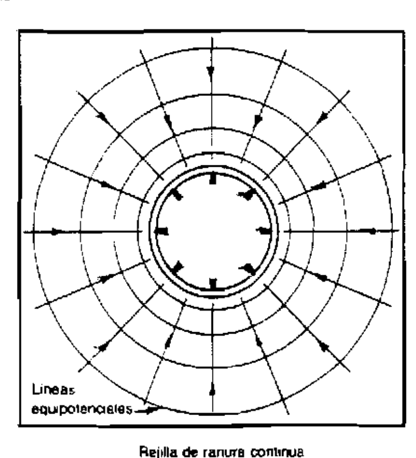
Fig. 90: El abatimiento teórico del pozo de bombeo se puede comparar con el abatimiento real, extendiendo la línea recta del diagrama de distancia – abatimiento hasta un punto en donde el radio del pozo (pared exterior del mismo) queda indicado por la escala horizontal.





Elevacion





Tubo ranurado Planta Rejilla de ranura continua

Fig. 91: Redes de flujo en torno a ciertos dispositivos de captación. El agua fluye hacia las aberturas a lo largo de las trayectorias indicadas por las flechas. En la tubería ranurada, el agua converge hacia las ranuras individuales. En el caso de rejillas, las líneas de flujo se distorsionan menos.

Radio de Influencia

En la mayoría de los casos, el radio de influencia de un pozo puede obtenerse mediante el uso del diagrama de distancia-abatimiento. A muchos propietarios de pozos les interesa esta información que ellos describen como "cuán lejos del pozo se extiende el cono de presión". Para todos los propósitos prácticos, éste es la distancia que se obtiene al extender la línea recta de gráfico de distancia-abatimiento, hasta intersectar el punto de abatimiento nulo en la escala de abatimientos. Obsérvese que esta distancia corresponde a r_0 en la fórmula (8a).

Algunas personas creen que el radio de influencia debería ser el factor determinante del espaciamiento de pozos, para evitar con ello cualquier interferencia que pudiera manifestarse entre éstos. Claramente se puede ver que esto es a menudo impráctico, especialmente tratándose de acuíferos artesianos.

Cuando el cono de depresión tiende a volverse estable y se acerca a las condiciones

de equilibrio durante una prueba de bombeo, el efecto que ejerce sobre la pendiente de la recta de distancia-abatimiento, es casi imperceptible por lo general. El cono de depresión se puede estabilizar como resultado de alguna recarga por precipitación, percolación proveniente de estratos saturados sobreyacientes al acuífero propiamente dicho o por el flujo natural de agua subterránea que tiene lugar en el pozo o a un lado de éste. El equilibrio también puede ser el resultado de alguna recarga producida por un lago o por un río, considerados como una fuente lineal de recarga, cuando se desarrolla un gradiente hidráulico entre la fuente de recarga y el pozo de bombeo.

Efectos de Recarga y de Barrera

En el caso de la recarga inducida, el cono de depresión es más empinado en dirección hacia la fuente de recarga que en otras direcciones a partir del pozo. Sin embargo, la pendiente indicada por el gráfico de distancia-abatimiento, obtenido durante una prueba de bombeo, será muy parecida en todas direcciones, si la fuente de recarga se halla muy alejada y si los pozos de observación se encuentran relativamente cerca del pozo de bombeo.

Cuando un lago o río se hallan cerca, las mediciones realizadas en los pozos de observación que se hallen situados entre el pozo de bombeo y la fuente de recarga darán por resultado un gráfico de distancia-abatimiento de pendiente mayor que la normal. Lo anterior tiene lugar porque el efecto de la recarga es el de disminuir el abatimiento en el pozo de observación más próximo a ésta, en comparación con los otros pozos de observación ubicados al lado opuesto del pozo de bombeo. Exceptuando la condición anterior, la pendiente del gráfico de distancia-abatimiento brinda, sin embargo, un criterio confiable para calcular la transmisividad del acuífero, no obstante el efecto de recarga.

Cuando se trata de calcular el coeficiente de almacenamiento, en condiciones de recarga, no es válido lo anterior. Los efectos de la recarga afectan la posición de la recta de distancia-abatimiento en el sentido vertical. Como resultado de ello, el valor de r_0 resulta ser menor del que se tendría en condiciones de ausencia de recarga. A su vez, esto hace que el valor del coeficiente de almacenamiento sea mayor que su valor real. En algunos casos, el valor así calculado del coeficiente de almacenamiento, resulta ser mayor que la unidad, un valor absurdo, y tal resultado prueba, sin lugar a dudas, la existencia de una recarga.

La presencia de barreras impermeables afecta al gráfico de distancia-abatimiento de manera contraria a como lo hace la recarga. Si la distancia a cualquier barrera es relativamente grande, comparada con las distancia a los pozos de observación, la pendiente del gráfico resulta afectada muy levemente. Sin embargo, aquellos pozos cercanos a la barrera mostrarán abatimientos mayores que lo normal, y el gráfico de distancia–abatimiento resultante, será de pendiente un poco más aplanada de lo que sería en otras condiciones. Ello conduce a un valor calculado de la transmisividad, mayor que el valor verdadero. El valor calculado del coeficiente de almacenamiento es menor que el valor real, debido a que la recta de distancia-abatimiento es desplazada hacia abajo, en el diagrama semilogarítmico, como resultado de la influencia que ejerce la barrera del acuífero. Un valor bajo absurdo del coeficiente de almacenamiento, indica por lo general la existencia de una barrera impermeable dentro de la zona de influencia del pozo de bombeo.

Uso Combinado de Gráficos Semilogarítmicos

Ya hemos visto cómo los cálculos efectuados con base en los gráficos de tiempo-abatimiento, pueden utilizarse para

verificar los que se hayan hecho mediante gráficos de distancia-abatimiento y viceversa. Cuando el agua se obtiene únicamente del almacenamiento, en un acuífero homogéneo y extenso, ambos gráficos dan idénticos resultados. Los cálculos hechos mediante un diagrama, son independientes de los del otro, suponiendo que el gráfico de distancia-abatimiento se ha obtenido de las mediciones hechas en dos o más pozos de observación.

Si aparece algún efecto de recarga durante la prueba de bombeo, o si el cono de depresión en expansión encuentra una barrera impermeable del acuífero, hemos visto que los efectos sobre los dos gráficos son diferentes. La Tabla XVII resume estos contrastes.

El conocimiento de estos efectos diferentes, puede resultar ventajoso al interpretar pruebas de acuífero.

Supóngase, por ejemplo, que se ha realizado una prueba y que se tienen las mediciones de abatimiento de tres pozos de observación. Admítase además que los gráficos de tiempo-abatimiento sólo muestran una línea recta, claramente definida. La transmisividad calculada con base en la pendiente de estos gráficos, resulta ser de alrededor de la mitad del valor de la transmisividad calculada mediante el gráfico de distancia-abatimiento. El resultado obtenido conduce a la sospecha de que algún efecto de barrera influyó en la magnitud de los abatimientos, tan al inicio del periodo de bombeo, que el quiebre en la pendiente del diagrama de tiempo-abatimiento no es perceptible.

Tabla XVII

Comparación de los Efectos de Recarga y de Barrera sobre los Diagramas Semilogarítmicos

Diagrama de Tiempo-Abatimiento	Diagrama de Distancia-Abatimiento
Efecto de la Recarga Durante la Prueba de Bombeo	
1. La pendiente del gráfico se suaviza. Si la transmisividad se calcula con base en la pendiente más suave, será mayor que su valor verdadero.	1. La pendiente de la línea recta permanece casi inalterada. La transmisividad del acuífero calculada mediante el gráfico, se aproxima por lo general a su valor verdadero
2. Al extender la línea recta de pendiente más suave, dará por resultado un valor erróneo de t_0 que es muy bajo. Los cálculos hechos, utilizando este valor, darán una magnitud del coeficiente de almacenamiento menor que la correcta.	2. La línea recta se desplaza hacia arriba. La extensión hasta el eje de abatimiento nulo, da un valor de r_0 que cuando se usa para calcular el coeficiente de almacenamiento, da como resultado una magnitud mayor que la correcta.
Efecto de una Barrera Durante la Prueba de Bombeo.	
1. La pendiente del gráfico se empina. Si la transmisividad se calcula con base en la pendiente mayor, resultará menor que su valor verdadero.	1. La pendiente de la línea recta permanece casi inalterada. La transmisividad del acuífero, calculada mediante el gráfico es, por lo general, cercana a su valor correcto.
2. Al extender la línea de mayor pendiente, se obtendrá un valor erróneo de t_0 que es muy alto. Al calcular el coeficiente de almacenamiento con el valor anterior, se obtiene una magnitud por encima de su valor correcto.	2. La línea recta se desplaza hacia abajo. Su extensión a la escala de abatimiento nulo, da un valor erróneo de r_0 que al calcular el coeficiente de almacenamiento, dará un valor menor que el correcto.

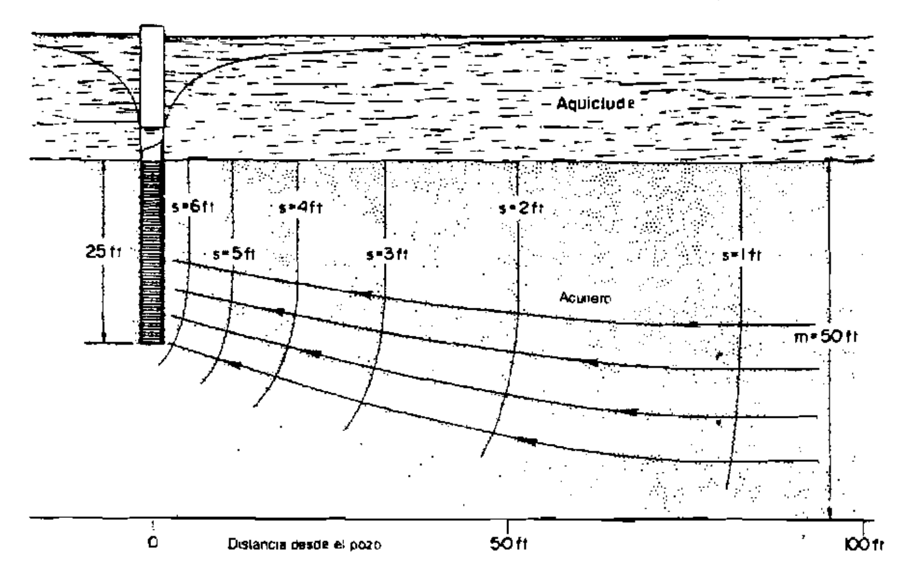


Fig. 92: Cuando el intervalo de captación de un pozo, penetra parcialmente el acuífero, las líneas reales de flujo se desvían un poco del régimen radial que tendría lugar en un pozo de penetración total.

Refiriéndonos a la Fig. 77, vemos que en este caso, cualquier desviación anormal, durante los primeros 10 minutos de bombeo, no es perceptible en el diagrama semilogarítmico

Sin embargo, al comparar los cálculos del coeficiente de almacenamiento en este ejemplo, podemos confirmar la sospecha de una condición de barrera, si el valor dado por el gráfico de tiempo-abatimiento es mayor que el obtenido del diagrama de distancia-abatimiento. En este caso, ninguno de los dos corresponde al valor verdadero. Este caería entre las dos cifras anteriores, consideradas como valores límite. El valor correcto del coeficiente de transmisividad es aquél que se obtenga del diagrama de distancia-abatimiento.

Hasta aquí, la mayor parte de nuestra discusión, referente al comportamiento de los pozos, se ha basado en la suposición de que el flujo hacia éstos es enteramente radial. La Fig. 65 ilustra esta condición, en que todas las líneas de flujo son horizontales y no tienen ninguna componente vertical. En este diagrama el flujo es radial porque (1), se refiere a un acuífero artesiano, (2) se trata de un pozo en que la longitud de la rejilla es igual al espesor del acuífero, y (3) existe una condición de bombeo tal, que la formación cercana al pozo no se deseca.

Efecto de la Penetración Parcial

Cuando no existe flujo extrictamente radial, el régimen de éste y la magnitud de los abatimientos, difieren un poco de los que se calculen mediante las fórmulas que se han presentado. La Fig. 92 muestra un acuífero artesiano en el cual se ha colocado rejilla únicamente en la mitad superior. En la figura, las flechas representan algunas líneas de flujo características, o sea, trayectorias de las partículas de agua conforme éstas se desplazan a través de la formación hacia el intervalo de captación del pozo. Es evidente la desviación que existe, del régimen de flujo radial.

El agua de la región inferior del acuífero debe moverse a lo largo de líneas curvas para poder alcanzar las aberturas de la rejilla. Al hacerlo así, el agua recorre trayectorias de

mayor longitud que las que corresponderían a líneas de flujo radiales. El resultado que se obtiene con trayectorias más largas, es el de un aumento en las pérdidas de carga, o lo que es lo mismo, el de un incremento de los abatimientos dentro del pozo, con relación a aquéllos en el acuífero, a cualquier distancia horizontal medida desde el pozo. Por lo tanto, para un rendimiento dado, el abatimiento dentro del pozo de bombeo será mayor si el espesor del acuífero se encuentra parcialmente enrejillado. Para un abatimiento dado, la descarga de un pozo que penetra parcialmente el acuífero resulta menor que la de otro pozo que penetre totalmente el mismo.

Puede observarse en la Fig. 92 que los abatimientos cerca del pozo de bombeo varían de acuerdo con la profundidad alcanzada dentro del acuífero. Esta variación del abatimiento, con la profundidad, es más pronunciada en la zona adyacente al pozo, y desaparece conforme aumenta la distancia desde el mismo. A una distancia aproximadamente igual al doble del espesor del acuífero, la línea que representa el abatimiento en éste, es vertical, indicando ello que el abatimiento es el mismo a cualquier profundidad. A esta distancia y más allá, prevalecen las condiciones de flujo radial.

El análisis matemático de los problemas de penetración parcial, resulta dificultoso en el caso de acuíferos homogéneos, y cuando se trata de acuíferos estratificados, es casi imposible desarrollar las ecuaciones del caso. La familia de curvas mostrada en la Fig. 93, brinda una manera simplificada de estimar los resultados que se obtienen en pozos que penetran acuíferos artesianos razonablemente homogéneos. Este diagrama ha sido desarrollado mediante la fórmula de Kozeny[10] cuya expresión puede escribirse de la siguiente manera:

$$\left(\frac{Q/sp}{Q/s} = l\,(1 + 7\sqrt{\frac{r}{2\,ml}}\,\cos\frac{\pi l}{2}\right) \quad (9)$$

en la cual:

Q/s_p = capacidad específica de un pozo parcialmente penetrante, en m³/h/metro.

Q/s = Máxima capacidad específica posible de un pozo totalmente penetrante, en m³/h/metro. (El miembro izquierdo de la ecuación es el cociente de la producción de un pozo que penetra parcialmente el acuífero entre la producción de un pozo que penetra en su totalidad a éste).

r = radio del pozo, en metros.

m = espesor del acuífero, en metros.

l = longitud de la rejilla del pozo, expresada como una fracción del espesor del acuífero.

Esta fórmula no es válida cuando el espesor del acuífero es pequeño, el porcentaje de penetración es grande y además, el valor del radio del pozo, es alto. Los resultados que se calculen para algunas combinaciones de las condiciones anteriores, serían mayores que los de un pozo de penetración completa, lo que es imposible. Las curvas de la Fig. 93, representan las condiciones que prevalecen dentro del rango de validez de la fórmula.

Para utilizar las curvas, la longitud de rejilla debe expresarse como un porcentaje del espesor del acuífero. Una vez localizado este valor en la escala horizontal, debe desplazarse a lo largo de una línea vertical hasta intersectar la curva que corresponde a la relación entre el espesor de acuífero y radio del pozo, para el caso en cuestión. Al moverse luego horizontalmente, se podrá leer el porcentaje de máxima capacidad específica obtenible, en la escala vertical. Este resultado corresponde a la capacidad específica de un pozo que penetre parcialmente, expresado como un porcentaje de la capacidad específica que se podría

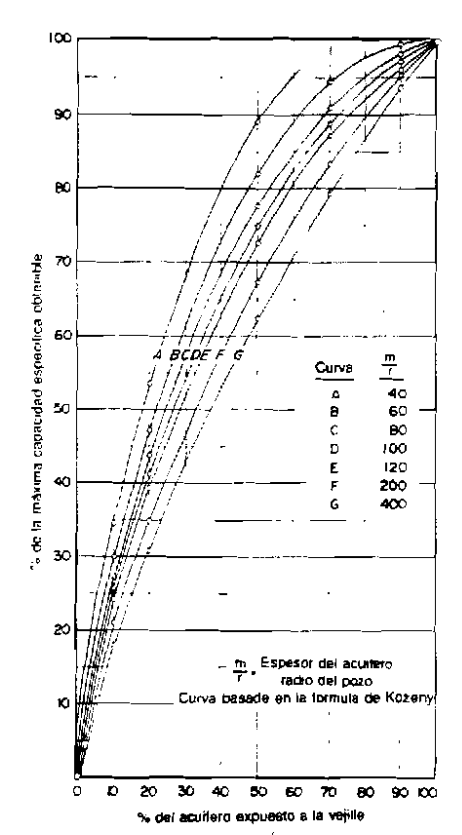


Fig. 93: Relación entre la penetración parcial y la capacidad específica obtenible, de pozos emplazados en acuíferos artesianos homogéneos.

obtener en el caso de que el pozo penetrara en su totalidad.

La capacidad específica de un pozo que penetre en su totalidad, se define aquí como la máxima capacidad específica posible.

El análisis de los diseños alternativos de pozo mostrados en la Fig. 94, nos brinda un ejemplo práctico del uso de las curvas. Ambos pozos son de 30 cm. de diámetro, 15 cm. de radio y cada uno se halla dotado de 15 m. de rejilla. Se supone que el acuífero es artesiano y homogéneo. En el pozo A, la rejilla se encuentra colocada en la mitad inferior del acuífero, haciendo la relación m/r = 200. La Fig. 93 nos muestra que en este pozo es de esperarse un 68 por ciento de la máxima capacidad específica posible. Usando la fórmula (5), se obtiene que la capacidad específica de un pozo, que penetre totalmente el acuífero, y de 15 cm. de radio, es de 7.6 m³/hora por metro de abatimiento, despues de transcurridas 24 horas de bombeo. La capacidad específica esperada del pozo A, será entonces del 68 por ciento de la cifra anterior, o sea, 5.18 m³/h/m. El abatimiento disponible hasta el techo del acuífero es de 30 m., de modo pues que el rendimiento sería de 5.18 x 30 = 155.4 m³/hora.

En el pozo B, los 15 m. de rejilla se han distribuído en 5 secciones de 3 m. cada una. Estas secciones se han alternado a su vez con 5 tramos de ademe ciego, de 3 m. de longitud. En las condiciones anteriores, los 30 m. de acuífero pueden tratarse como 5 acuíferos, cada uno de un espesor de 6 m. y 50 por ciento de rejilla. Lo anterior cambia el valor de m/r. La ventaja de la distribución anterior, se torna evidente según las curvas. Al enrejillar 50 por ciento de un acuífero de 6 m. de espesor, m/r = 40, podemos esperar un 89 por ciento de la máxima capacidad específica posible. De lo anterior se deduce que el rendimiento estimado del pozo B, es de 203 m³/hora, o sea, un 31 por ciento mayor que el del pozo A. (Para facilitar esta comparación, se han ignorado las pérdidas de entrada).

En un pozo de acuífero freático, el problema de la penetración parcial debe siempre tenerse en cuenta, porque el bombeo deseca la parte superior del acuífero. El hecho anterior reduce el espesor saturado y necesariamente acorta el intervalo de captación del pozo. A menudo se bombea un pozo freático en cantidad tal que su abatimiento llega a ser una proporción apreciable del espesor del acuífero. La condición anterior, da por resultado un régimen de flujo grandemente distorsionado, comparado con el de un flujo estrictamente radial.

La Fig. 73 es la que debe usarse para

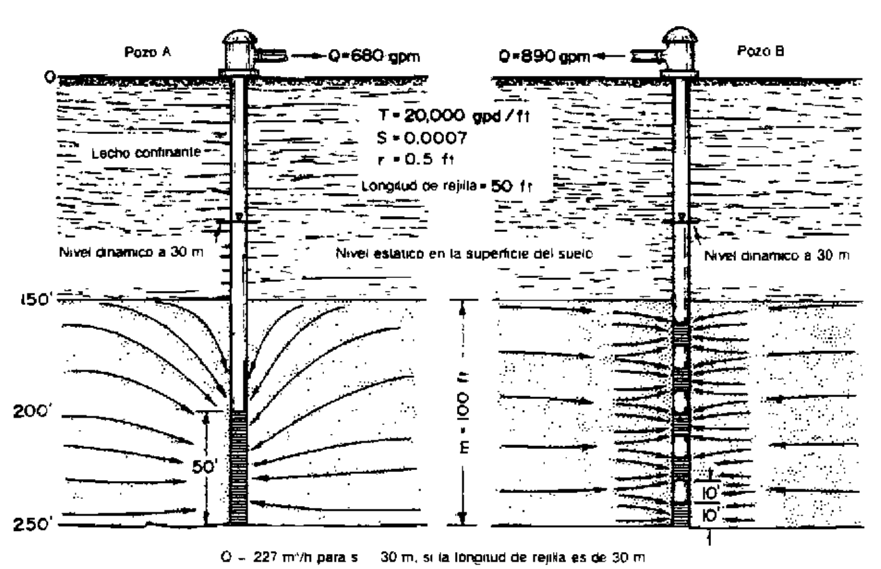


Fig. 94: El comportamiento de un pozo puede mejorarse usando secciones múltiples de rejilla, en el caso de acuíferos de espesor considerable, para reducir el efecto de la penetración parcial. La longitud total de rejilla, es la misma en ambos casos.

estimar el efecto de la penetración parcial, en los pozos que penetran acuíferos freáticos. Las curvas suponen condiciones de un total enrejillamiento, desde el nivel de bombeo, hasta el fondo del acuífero. La Fig. 93 y la fórmula (9), no son aplicables, por lo general, en condiciones freáticas.

Cuando el bombeo de un pozo es interrumpido, los niveles de agua en éste y en el acuífero recuperan desde la posición a que habían descendido, tendiendo a alcanzar de nuevo el nivel que existía antes del bombeo. La razón a la cual se verifica la recuperación, brinda una manera de calcular los coeficientes de transmisividad y de almacenamiento. El registro de tiempo-recuperación constituye, pues, una parte importante de cualquier prueba de acuífero.

Uso de los Datos de Recuperación del Nivel del Agua

Las mediciones de tiempo-abatimiento, durante el período de bombeo, y las de tiempo-recuperación, durante el período de recuperación, proporcionan dos grupos distintos de información mediante una sola prueba de acuífero. Los valores obtenidos del análisis de un registro de recuperación, sirven para verificar los cálculos que se basan en un registro de bombeo.

Cuando se dispone al menos de un pozo de observación, situado a distancia razonable del pozo de bombeo, los datos de recuperación del nivel del agua, obtenidos de aquél, reflejan plenamente las características del acuífero. Cuando no se tiene un pozo de observación, los datos de recuperación obtenidos en el pozo de bombeo pueden utilizarse para cálculos limitados de la capacidad del acuífero.

De ser posible, debe utilizarse por lo menos un pozo de observación. Sería de desear el contar con dos o más. En todos los casos, los niveles del agua deben de medirse tanto en el pozo de bombeo como en cada uno de los pozos de observación.

Durante el período de bombeo la extracción debe efectuarse a un caudal constante. Solamente cuando esta condición

se satisface es que se pueden analizar los datos de recuperación, tal como se describe a continuación. Los datos de recuperación, tomados con posterioridad a una prueba de caudal variable, tal como una prueba escalonada, no se pueden utilizar. Debe registrarse el tiempo exacto a que tiene lugar el inicio y la interrupción del bombeo, anotando cualquier cambio inevitable del caudal y el tiempo exacto a que tuvo lugar. Las curvas de recuperación, que reflejan la respuesta del acuífero, indican el cambio de nivel del agua que se manifiesta con el tiempo. Por lo tanto, una parte esencial del registro es el tiempo exacto a que cada medida se efectúa. No es necesario hacer las mediciones simultáneamente en todos los pozos, pero los intervalos entre las lecturas deberán ser más o menos parecidos.

En cada pozo debe establecerse la elevación del punto de referencia para las mediciones, el que usualmente es la boca del ademe. Se necesita una sonda eléctrica o una cinta metálica aplomada para medir con exactitud la profundidad del agua. Las lecturas que se toman con línea de aire y manómetro no resultan de confianza para este tipo de prueba.

La Fig. 95 muestra la manera en que los niveles del agua en un pozo varían con el tiempo. La parte izquierda del diagrama corresponde al período de bombeo, y la mitad derecha al período de recuperación que sigue después de haberse detenido el bombeo. La figura nos muestra que la curva de recuperación equivale prácticamente a una imagen invertida de la curva de abatimiento. La forma exacta de cada una de las curvas se halla influída por las características físicas del acuífero. El análisis que pone en evidencia estas características implica un examen detallado de la curva de tiempo-recuperación.

Los puntos que realmente se llevan a la región de la mitad derecha de la Fig. 95, representan el *abatimiento residual* dentro del pozo, durante el peíodo de recuperación. Cada uno viene a ser la diferencia entre el nivel estático original y la profundidad del agua en cada instante del período de recuperación. Por lo tanto, cada valor es el abatimiento remanente, o sea, la distancia

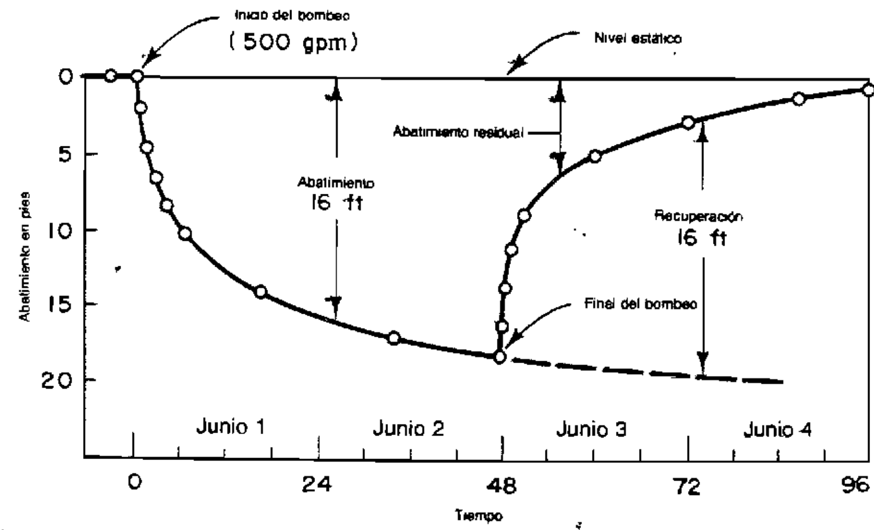


Fig. 95: Curvas típicas de abatimiento y recuperación, de un pozo bombeado durante 48 horas, a razón constante de 113.2 m³/hora, siguiendo un periodo de reposo para medir la recuperación de los niveles.

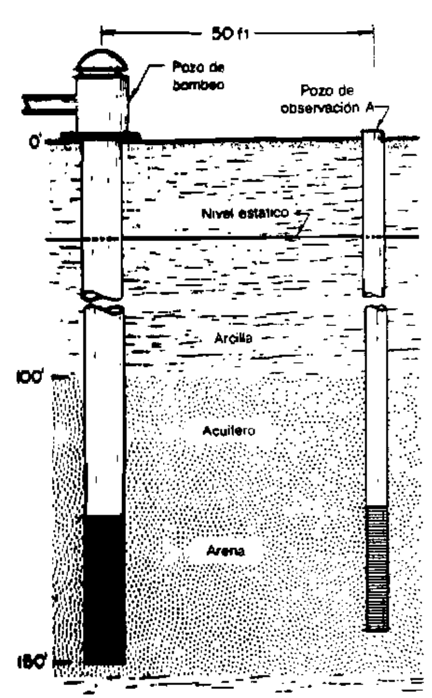


Fig. 96: Pozo de producción y pozo de observación A, utilizados en la ejecución de una prueba de acuífero.

que el nivel debe aún recuperar para alcanzar el nivel estático inicial.

La recuperación real del nivel del agua, esto es, la elevación a que el agua asciende después de que el bombeo cesa, debe ser expresada con relación al nivel de bombeo. La teoría hidráulica de los pozos y del comportamiento de un acuífero, describe los cambios de nivel del agua durante el período de recuperación como el resultado del efecto de un pozo imaginario de recarga. Si un pozo tal inyecta agua dentro del acuífero al mismo caudal que se extrae del pozo de bombeo, ambos pozos operando simultáneamente después de un instante dado, la curva de recuperación ostentará la forma que se muestra en la Fig. 95. El ascenso del nivel del agua, debido al pozo imaginario de recarga, viene a ser la distancia vertical comprendida entre la prolongación de la curva de tiempo-abatimiento y la curva que representa los niveles del agua durante el período de recuperación.

La recuperación, pues, significa la diferencia entre el nivel medido del agua en un pozo de observación, a un tiempo dado después de cesar el bombeo, y el nivel a que el agua se hallaría, de haber continuado el bombeo hasta ese instante.

Definida en la forma anterior, la magnitud de la recuperación del nivel del agua, en cualquier instante después del final del período de bombeo, es teóricamente idéntica al abatimiento que se observaría después de transcurrir un tiempo igual del período de bombeo. Dicho de otra manera, la recuperación, a las 24 horas de haber cesado el bombeo, sería igual al abatimiento que se manifestaría a las 24 horas después de haberse iniciado el bombeo. Posteriormente se discutirán las excepciones a esta relación teórica y el porqué de éstas.

Debe observarse, sin embargo, que el retorno al nivel estático del agua toma un período de recuperación considerablemente mayor que el período anterior de bombeo, excepto en aquellos casos en que el acuífero recibe alguna recarga durante ambos períodos.

Supóngase que disponemos de un pozo de prueba de 15 cm. de diámetro y de otro pozo de observación situado a 15 m. del primero, para la realización de una prueba de bombeo, tal como se muestra en la Fig. 96. Después de bombear el pozo a razón de 113.2 m³/h., durante 500 minutos, la bomba es detenida y se toman niveles de la recuperación durante 400 minutos del período correspondiente.

La Tabla XVIII muestra las medidas de la profundidad del agua del pozo A y el abatimiento residual, a intervalos de tiempo, tanto a partir del inicio del bombeo como desde el comienzo del período de recuperación. Estos intervalos se han designado como t y t/t', respectivamente. La relación de tiempo para ambos períodos t/t', se muestra también en la tabla.

Tabla XVIII
Abatimiento Residual y Recuperación Calculada

Abatimiento Residual					Datos de la Recuperación *	
Tiempo a partir del inicio del bombeo t_1 (min)	Tiempo a partir del cese del bombeo t_1 (min)	Relación t/t'	Profundidad del agua** (m)	Abatimiento residual** s' (m)	Abatimiento medido desde la curva de bombeo extrapolada* s, (m)	Recupe-calculada $(s-s')$ (m)
500	0	—	5.68	3,23	3.23	0,00
501	1	501	5.61	3.18	3.23	0,05
502	2	251	5.64	3,20	3.23	0,03
503	3	168	5.61	3,18	3.235	0,055
504	4	126	5.52	3.07	3.235	0,165
506	6	84	5.40	2,96	3.24	0,28
508	8	64	5,25	2.81	3.24	0,43
510	10	51	5.17	2,63	3,25	0.62
520	20	26	5.16	2,22	3.25	1,03
530	30	17.7	4.42	1,98	3,26	1,28
540	40	13.5	4,16	1,715	3,27	1.555
560	60	9.35	3,95	1,51	3,29	1,78
590	90	6.55	3.67	1,22	3,34	2,12
650	150	4.33	3.30	0,855	3,40	2,545
710	210	3,38	3.26	0,825	3.46	2.635
770	270	2.85	3,07	0,628	3,52	2,892
830	330	2.51	3.03	0.598	3,59	2,992
890	390	2.28	2.93	0,488	3,64	3,152

*El caudal medio, durante el período precedente de bombeo, fue de 45 m³/hora.
**El nivel estático del agua era de 2,40 metros

La Fig. 97 exhibe la curva de recuperación obtenida de los datos de la prueba. La extensión de la curva precedente indica el abatimiento que se hubiese manifestado en el pozo de observación A, de haber continuado el bombeo después de cesar el funcionamiento de la bomba. La recuperación del nivel del agua a varios intervalos de tiempo, es la diferencia entre ambas curvas del diagrama. Los valores correspondientes se indican en la Tabla XVIII.

La curva, tal como aparece trazada en la Fig. 97, no se presta por sí sola a un análisis matemático. Sin embargo, puede simplificarse, para hacerla susceptible de análisis, de dos maneras, a saber: el corolario de Theis en la fórmula de no equilibrio[5] o la modificación de la fórmula de no equilibrio, de Jacob.[7] Ya hemos visto anteriormente que la curva de tiempo-abatimiento, para el período de bombeo, se convierte en una línea recta, excepto la porción inicial, cuando se traza sobre un diagrama semilogarítmico. Esta misma simplificación puede aplicarse a la curva de tiempo-recuperación, en la cual la escala horizontal representa el logaritmo del tiempo durante el período de recuperación y la escala vertical corresponde al valor de la recuperación, $(s - s')$.

Los datos dados en la Tabla XVIII, ploteados en la forma descrita, se muestran en la Fig. 98. Se observa que el resultado es similar a una curva de tiempo-abatimiento, en la parte correspondiente al bombeo, de la misma prueba de acuífero. Teóricamente, las curvas de abatimiento y de recuperación

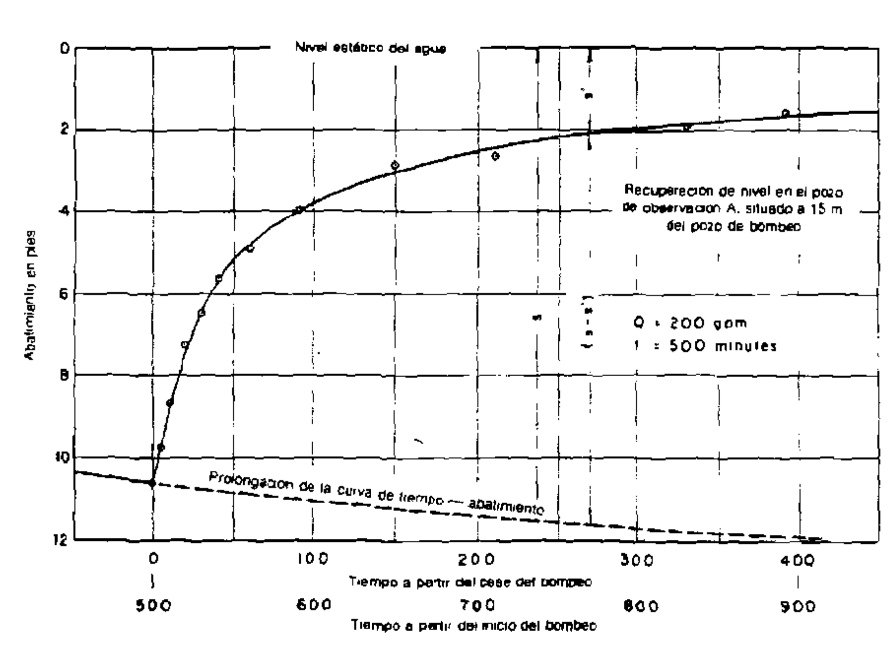


Fig. 97: Curva aritmética de abatimiento residual, del pozo de observación A, mostrando la extensión de la curva de tiempo abatimiento, y cómo se calcula la recuperación en cualquier instante del período correspondiente. El caudal del pozo de bombeo era de 45 m³/hora, durante 500 minutos.

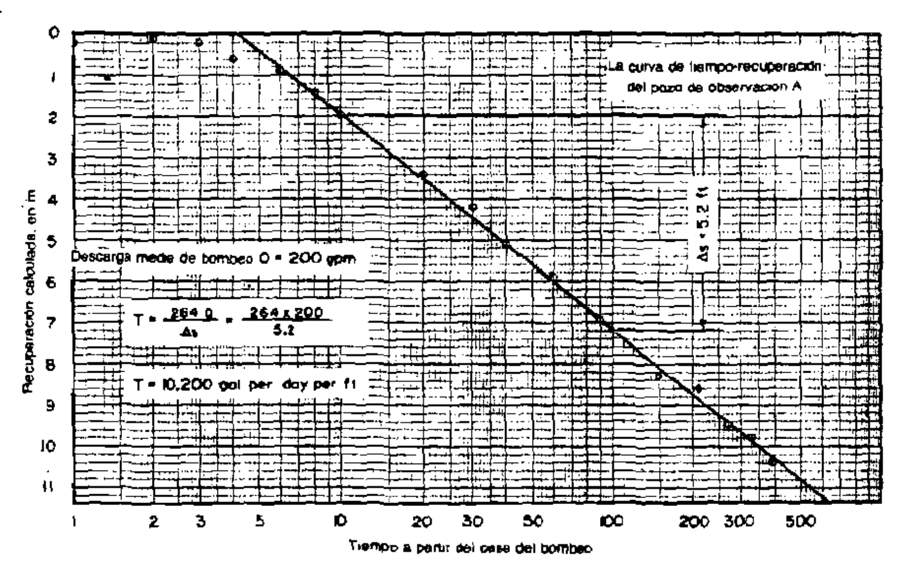


Fig. 98: La curva de tiempo-recuperación del pozo de observación A, se torna una línea recta cuando se traza en un diagrama semilogarítmico y es similar al diagrama de tiempo-abatimiento correspondiente al período precedente de bombeo.

trazadas en esta forma, deberían ser idénticas, si las condiciones del acuífero se ajustaran a las suposiciones básicas del concepto de Theis.

Los datos de recuperación del pozo de bombeo, también pueden plotearse al igual que se ha hecho con los del pozo de observación A. La curva de tiempo-recuperación correspondiente al pozo de bombeo, resulta más exacta que su curva de tiempo-abatimiento, debido a que las mediciones de abatimiento residual son más precisas. Durante el período de recuperación las medidas del nivel del agua pueden tomarse sin la interferencia de la vibración de la bomba, y sin que se alteren por las variaciones de la descarga.

Al analizar la curva de tiempo-recuperación, su pendiente es de primordial interés. Dos son los factores que determinan la pendiente de la línea recta mostrada en la Fig. 98. Uno de ellos es el caudal medio de bombeo utilizado durante el período correspondiente. El otro es la transmisividad del acuífero, una de las propiedades hidráulicas importantes que se trata de determinar.

En la Fig. 98, la pendiente de la línea recta se expresa numéricamente como el cambio de nivel de recuperación que tiene lugar en un ciclo logarítmico. Se designa por el símbo $\Delta\ (s\text{-}s')$. En la Fig. 98, su valor numérico es de 1.58 m., que corresponde a la recuperación habida durante el período que va de 10 minutos a 100 minutos, después del cese del bombeo.

El próximo paso consiste en calcular la transmisividad del acuífero, la que se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$T = 0.183\ Q\ /\ \Delta\ (s\text{-}s')$$

Obsérvese que esta fórmula es similar a la expresión (7). La Fig. 98 nos muestra que el valor de T es de alrededor de 5.26 m³/h/m. Este valor puede compararse con el calculado mediante los datos de tiempo-abatimiento que se muestran en la Fig. 84. Si las condiciones de la prueba se ajustan a las normas y las mediciones se efectúan cuidadosamente, ambos resultados deberán concordar razonablemente bien.

Un segundo método que se utiliza para el ploteo de los datos, permite el uso directo de los valores de abatimiento residual, sin necesidad de calcular la recuperación a partir de la prolongación de la curva de tiempo-abatimiento. Puede demostrarse que el abatimiento residual, se relaciona con el logaritmo del cociente t/t', tal como sigue:

$$s' = \frac{0.183\ Q\ \log t/t'}{T} \qquad (11)$$

En el Apéndice, se da el desarrollo matemático de la relación anterior.

Esta fórmula demuestra que cuando se plotean valores de s' contra los correspondientes valores de la relación t/t', en papel de gráficos semilogarítmicos, se logra trazar una línea recta a través de los puntos. La Fig. 99 muestra los datos de la Tabla XVIII llevados a un diagrama semilogarítmico, indicándose los valores de s' en la escala aritmética vertical y los de t/t' en la escala logarítmica horizontal. La transmisividad se calcula entonces, mediante la siguiente fórmula:

$$T = 0.183\ Q\ /\ \Delta s' \qquad (12)$$

expresión en la cual:

- T coeficiente de transmisividad, en m³/h/m.
- Q caudal de bombeo, en m³/hora
- $\Delta s'$ variación del abatimiento residual por ciclo logarítmico de los valores de t/t'.

Puede observarse en la Fig. 99, que el valor del tiempo, durante el período de recuperación aumenta hacia la izquierda en este método de obtener el gráfico, en tanto que en los diagramas de tiempo – abatimiento y tiempo – recuperación, el tiempo aumenta hacia la derecha.

Para calcular la transmisividad, se

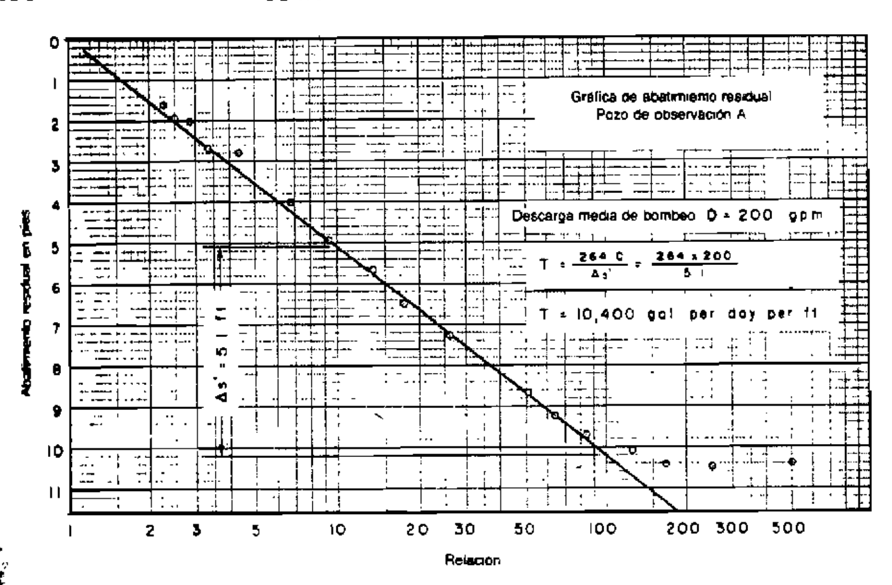


Fig. 99: El abastecimiento residual, ploteado contra la relación t/t', se vuelve una línea recta en un gráfico semilogarítmico. La anterior permite el cálculo de la transmisividad, tal como se indica. En este diagrama, el tiempo aumenta hacia la izquierda del mismo.

prefiere plotear la curva de abatimiento residual, tal como en la Fig. 99, en lugar de la curva de recuperación como se muestra en la Fig. 98. El método de la Fig. 99, brinda una manera independiente de verificar los resultados calculados con base en el período de bombeo.

El método de la Fig. 98 depende de la extensión de la recta de tiempo-abatimiento, hasta el período de recuperación. De este modo, la curva de abatimiento queda involcrada implícitamente en la determinación de los valores de recuperación, que se utilizan al plotear la curva de ésta, y las inexactitudes de la curva de abatimiento repercuten hasta cierto punto en aquélla.

Si no se dispone de un pozo de observación, los datos de recuperación del pozo de bombeo brindan la mejor base para calcular la transmisividad. En tales casos, deberá utilizarse siempre la curva de abatimiento residual que se ofrece en la Fig. 99.

Determinación del Coeficiente de Almacenamiento

Si durante el período de recuperación las mediciones se realizan en por lo menos un pozo de observación, el coefieiente de almacenamiento puede calcularse mediante una parte de los datos obtenidos. Los datos deben llevarse a un gráfico tal como el de la Fig. 98. La curva de abatimiento residual no puede utilizarse para el cálculo del coeficiente de almacenamiento, aunque sí es válida para calcular la transmisividad.

Las Fig. 100 y 101 muestran la similitud de los cálculos del coeficiente de almacenamiento, mediante los diagramas de tiempo-abatimiento y de tiempo-recuperación. Usando las fórmulas (7) y (7a), los datos de tiempo-abatimiento, referentes al pozo de observación B y tal como lo indica la Fig. 100, dan un valor de T = 6.7 m³/h/m., y S = 0.00058.

Paralelamente, los cálculos hechos mediante la Fig. 101, utilizando $\Delta(s\text{-}s')$ en lugar de Δs y t_0' en vez de t_0, nos

dan como resultado, T = 7.07 m³/h/m y S = 0.00045. Los pares de resultados obtenidos, parecieran concordar razonablemente.

Refiriéndonos ahora a la curva de abatimiento residual de la Fig. 99, resulta evidente que el valor de t_0' no se puede obtener del diagrama. La escala horizontal corresponde a una relación que es un número sin dimensiones. En este gráfico, pues, la intersección de la recta con el eje de abatimiento nulo, tiene un significado enteramente diferente.

Para discutir este punto, se hace necesario pasar revista a las suposiciones básicas enumeradas en la página 19, las cuales se utilizaron al desarrollar las fórmulas que permiten analizar los datos, tanto del período

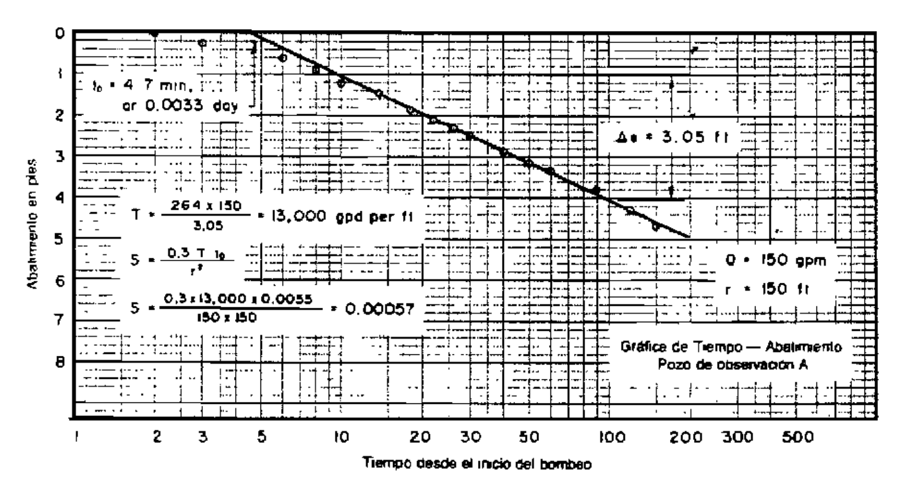


Fig. 100: Curva de tiempo – abatimiento, obtenida de las mediciones practicadas en un pozo de observación, situado a 45 m., del pozo de bombeo. El valor de t_0 que se ha usado al calcular el coeficiente de almacenamiento, S, se obtiene al extender la línea recta hacia la izquierda para intercectar el eje de abatimiento nulo.

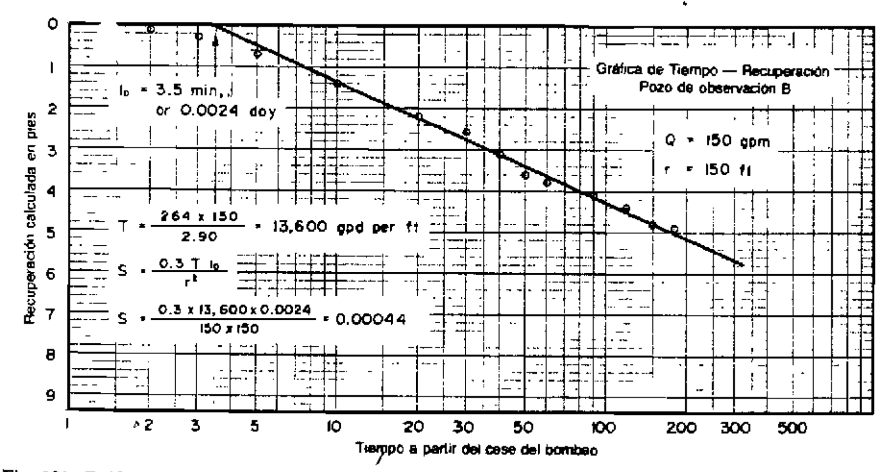


Fig. 101: Gráfico de tiempo – recuperación, del pozo de observación B, en que se muestra la recta extendida hacia la izquierda, para obtener el valor de t_0 que se utiliza en el cálculo del coeficiente de almacenamiento, S.

de bombeo, como del de recuperación, cuando se realiza una prueba de acuífero.

Cuando el acuífero se ajusta a estas suposiciones, al extender hacia la izquierda la recta de abatimiento residual, tal como en la Fig. 99, ésta debería pasar por el punto en que el abatimiento es cero y *t/t'* igual a uno. La relación *t/t'*, tiende a alcanzar un valor igual a la unidad, conforme el período de recuperación se extiende.

Después de transcurrir un largo período de recuperación, el nivel del agua dentro del acuífero tiende a retornar a su nivel estático original con un valor del abatimiento residual que se aproxima a cero, conforme la relación *t/t'* se acerca a un valor de uno. En teoría, por lo tanto, la recta de abatimiento residual debería pasar a través de la esquina superior izquierda del diagrama tal como se indica en la Fig. 99.

El estudio de las curvas de abatimiento residual, obtenidas de pruebas reales de acuífero, revela que la curva no siempre pasa por este punto, que podría denominarse el origen del diagrama. Cuando la curva no pasa por el origen, se llega a la conclusión de que las condiciones del acuífero no se ajustan a aquellas supuestamente ideales.

El gráfico de abatimiento residual sugiere tres maneras en que estas condiciones podrían diferir de las de un acuífero teórico. Si el gráfico indica un abatimiento nulo para un valor de $t/t' = 2$ o más, se llega a la conclusión de que el acuífero recibió alguna recarga durante el período de bombeo. La consecuencia de la recarga, es la de producir una recuperación casi completa del nivel del agua hasta su nivel estático original, en un tiempo relativamente corto, o sea, mucho antes de que *t/t'* se aproxime a un valor de uno. La curva superior de la Fig. 102, es la que se obtendría en una situación tal.

Una condición diferente es la que se manifiesta cuando la curva que se ha extendido hacia la izquierda indica un abatimiento residual de varios centímetros o más, conforme *t/t'* se acerca a la unidad. Esta situación se presentaría en el caso de un acuífero de extensión limitada y que no experimenta recarga, cuando el bombeo ha ocasionado un descenso permanente del nivel estático del agua. Este resultado queda ilustrado por la curva inferior de la Fig. 102.

La tercera condición que tiene en cuenta un pequeño desplazamiento de la curva de abatimiento residual, es la consecuencia de una variación en el valor del coeficiente de almacenamiento, *S*. En teoría, se supone que el coeficiente de almacenamiento permanece constante, tanto durante el período de bombeo, como en el de recuperación, a través del tiempo que dura la prueba. En la práctica, es probable que *S* varíe y es susceptible de tener un valor mayor durante el período de bombeo que en el período subsecuente."

En los acuíferos confinados artesianos, el valor de *S* depende de las propiedades elásticas de la formación. Si ésta no es perfectamente elástica, no se expande verticalmente durante la recuperación de los niveles del agua (recuperación de la presión artesiana) a la misma velocidad a que comprimida, como resultado del abatimiento, durante el bombeo precedente.

Cuando se extrae agua de un acuífero freático, el aire ocupa los vacíos de la formación dentro del cono de depresión, pues parte del acuífero se deseca. El volumen de agua, drenado por metro cúbico de formación, corresponde al valor de *S*. Cuando el bombeo cesa, la superficie freática ascendente puede atrapar algo del aire en forma de burbujas, que se introducen en los vacíos. Así pues, será ligeramente menor la cantidad de agua que vuelve a llenar la porción desecada de la formación, dando por resultado que el valor de *S* sea menor durante la recuperación. La Fig. 103 describe esta condición en su forma más simple, mostrando cómo el valor de *S*, durante la recuperación, es de dos tercios del correspondiente al período de bombeo. El efecto de la variación de *S* sobre el gráfico de abatimiento residual, se observa en la curva central de la Fig. 102. Obsérvese

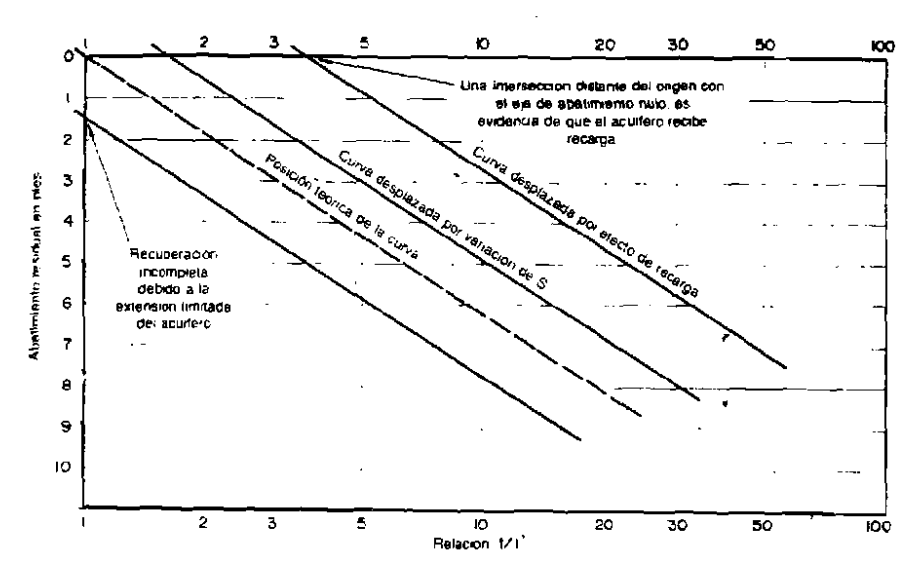


Fig. 102: Cuando el acuífero real difiere de las condiciones teóricas, la curva de abatimiento residual puede que se desplace de cualquiera de las tres maneras que se indican en el diagrama.

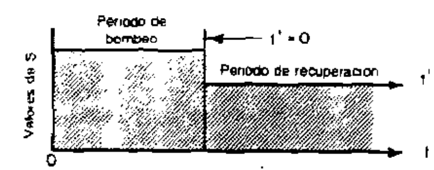


Fig. 103: El coeficiente de almacenamiento puede resultar menor durante el período de recuperación que durante el de bombeo.

que esta curva cruza la línea de abatimiento cero a un valor de *t/t'* entre 1 y 2.

En tanto que el análisis de los datos de abatimiento residual es de utilidad para interpretar los resultados de pruebas de bombeo, realizadas a caudal constante, este análisis no se puede aplicar para obtener una curva de distancia-abatimiento. Las lecturas tomadas en dos o más pozos de observación, en cualquier instante del período de bombeo, pueden plotearse, como ya hemos visto anteriormente, para representar la extensión del cono de depresión. La naturaleza de la recuperación del nivel del agua en el cono de depresión es tal que el abatimiento residual, en pozos de observación situados a diferentes distancias del pozo de bombeo, es el mismo, casi enseguida que el bombeo ha cesado.

Aunque pareciera que se ha puesto mucho énfasis en las posibles variaciones del valor de *S* y en el hecho de que su magnitud no siempre puede calcularse, debido al tipo de datos disponibles obtenidos de una prueba de bombeo, ello no implica que estas limitaciones invaliden la aplicación de los métodos básicos de análisis de acuíferos. Un error aún bastante considerable en el valor de *S*, no afecta grandemente los cálculos relativos al comportamiento de un pozo y a la interferencia que pueda tener lugar entre pozos.

Si el coeficiente de almacenamiento no se puede calcular mediante los datos de la prueba, ésta suministra otra información de utilidad que puede aplicarse. Se podría utilizar un valor asumido del coeficiente de almacenamiento, sabiendo si se trata de un acuífero freático o artesiano. Este criterio lo proporciona, en la mayoría de los casos, la información geológica de que se disponga. En un acuífero artesiano, se puede usar un valor de $S = 0.0005$; en otro que sea

freático, puede emplearse un valor de S = 0.10. El resultado de los cálculos será menos preciso que si se conocieran los valores reales, pero para la mayoría de los casos, será suficientemente exacto.

Aunque la mayor parte de los acuíferos presentan variaciones considerables y no se ajustan a todas las condiciones teóricas exigidas por el concepto de Theis, la experiencia lograda con la aplicación de las fórmulas y de sus relaciones gráficas ha sido satisfactoria. Cuando el acuífero no es uniforme, como se supone, la interconexión hidráulica a través de la formación geológica da como resultado un ajuste contínuo del flujo entre regiones locales de diferente permeabilidad. El cono de depresión tiende entonces a profundizarse y a extenderse de una manera tal, que refleja los valores promedio y globales de las características de transmisividad y almacenamiento del acuífero.

Los valores de T y S deben ser considerados como valores medios en una área dada. Consecuentemente, es de esperarse que existan algunas variaciones de la producción del pozo, en ciertos sitios específicos, cuando se ha pronosticado el comportamiento futuro con base en pruebas de acuíferos.

Referencias

1. SLICHTER, C. S., "*Theoretical Investigation of The Motion of Ground Water*," 19th Annual Report, (1899) U. S. Geological Survey, p. 359 Washington.
2. TURNEAURE, F. E. and RUSSELL, H. L., "*Public Water Supplies*" (1901) p. 269, John Wiley & Sons, Inc., New York
3. THEIM, G., "*Hydrologische Methoden*," (1906) pp. 56, Leipzig
4. MOGG, J. L. "*The Effect of Aquifer Turbulence on Well Drawdown*" Proceedings, American Society of Civil Engineers, Hydraulics Division, November, 1959, pp. 99-112, New York.
5. THEIS, C. V. "*The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and The Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground Water Storage*" Trans. Am. Geophysical Union, (1935) pp. 519-524, Washington
6. BROWN, RUSSELL H., "*Selected Procedures for Analyzing Aquifer Test Data*" Journal Am Water Works Association (1953) Vol 45, No. 8, pp 844-866, New York
7. COOPER, H. H., JR. and C. E. JACOB, "*A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History*" Trans Am. Geophysical Union, Vol 27, pp. 526-524, Washington
8. FERRIS, JOHN G., "*Ground Water Hydraulics as a Geophysical Aid*" State of Michigan Technical Report No. 1 (1948), Lansing, Michigan.
9. MUSKAT, M., "*The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*" (1946) pp. 121-286, J. W. Edwards, Inc., Ann Arbor, Michigan.
10. KOZENY, J., "*Theorie and Berechnung der Brunnen*," Wasserkraft u. Wasser Wirtschaft, (1933), Vol. 28, p. 101.
11. JACOB, C. E., "*Recovery Method for Determining the Coefficient of Transmissibility*," Water Supply Paper 15361, (1963) U.S. Geological Survey, Washington.

Factores de Conversión de Unidades

Símbolos	*par cambiar*	*en unidades de*	*multiplique por*
s, d, D	pulgadas	milímetros	25.4
s, r, m, h, H, R	pies	metros	0.305
Q	galones/minuto	litros/segundo	0.0631
Q	galones/minuto	metro cúbicos/hora	0.227
T	galones/dia/pie	metros cúbicos/hora/metro	0.0052
Q/s	galones/minuto/pie	litros/segundo/metro	0.745

Capitulo 7

Rejillas para Pozos

UNA REJILLA DE pozo sirve como sección de captación de un pozo que toma el agua de un acuífero de material no consolidado, tal como la arena. La rejilla permite que el agua fluya libremente hacia el pozo desde la formación saturada, evitando que la arena penetre, y además actúa como un retenedor estructural que estabiliza el agujero dentro del material no consolidado.

Para llenar plenamente su cometido, el diseño de la rejilla debe ser eficiente. Solamente cuando es capaz de permitir el paso de agua libre de arena al pozo, en cantidades abundantes y con un mínimo de pérdida de carga, es que la rejilla se considera adecuada. A menudo se denomina a la rejilla el "toque final" del pozo, para enfatizar la importancia que tiene como estructura hidráulica en el comportamiento eficiente del mismo.

Muchos tipos de rejilla para pozos que se fabrican de acuerdo con los estándares adoptados, se venden como productos comerciales. A menudo se ignoran las rejillas de pozo y las características ventajosas de su diseño. En su lugar y en ciertas circunstancias, se emplean sustitutos improvisados. El tubo ranurado es uno de ellos.

Las características que serían de desear en una rejilla diseñada apropiadamente, son las siguientes:

1. Aberturas en forma de ranuras, que sean contínuas e ininterrumpidas, alrededor de la circunferencia de la rejilla.
2. Poca separación de las ranuras abiertas, para proveer el máximo porcentaje de área de entrada.
3. Aberturas ranuradas en forma de V, que se ensanchan hacia adentro.
4. Construcción a base de un solo metal, para evitar la corrosión galvánica.
5. Adaptabilidad a distintas condiciones, mediante el uso de diversos metales.
6. Máxima área abierta en correspondencia con una adecuada resistencia.
7. Amplia resistencia para soportar las fuerzas a que la rejilla deberá estar sometida durante y después de su instalación.
8. Una serie completa de accesorios y aditamentos para el extremo, que facilite su instalación y las labores de acabado del pozo.

La rejilla del tipo de ranura continua se fabrica mediante el arrollado de alambre estirado en frío, de sección transversal aproximadamente triangular, colocado espiralmente alrededor de un sistema circular de barras longitudinales. En cada punto en donde el alambre cruza las barras, ambos elementos se aseguran firmemente. El sistema más resistente para unir el alambre a las barras, es el de soldadura. La rejilla de pozo que se fabrica a base de soldadura, se convierte en una unidad rígida de una sola pieza.

Las rejillas soldadas se fabrican de Everdur, bronce rojo al silicio, acero inoxidable tipo 304 o tipo 316, acero Monel, hierro galvanizado Armco y acero galvanizado de bajo contenido de carbono. También pueden usarse otros materiales altamente especializados, cuando se trata de aguas excesivamente corrosivas.

Otro método de fabricación de rejillas de ranura continua, consiste en introducir a presión el alambre externo dentro de escopladuras practicadas en las barras longitudinales. Lo anterior no constituye una fabricación tan resistente ni tan rígida como la de soldadura. Al escoplar las barras, se reduce la resistencia de estos miembros longitudinales.

Las aberturas, en el tipo de rejilla de ranura continua se obtienen separando como se desee los sucesivos anillos del alambre. Si se requieren aberturas de ranura de 0.020 pulgadas (0.508 mm), los alambres que forman la superficie de la rejilla, se separan a 0.020 pulgadas (0.508 mm) durante el proceso de fabricación. El ancho de las aberturas puede llevarse hasta tolerancias muy ajustadas mediante este proceso de fabricación con soldadura global. El proceso resulta también muy flexible, tanto que el tamaño de las aberturas puede cambiarse a voluntad durante la fabricación. Una misma sección o tramo de rejilla puede fabricarse de uno, dos o más diferentes tamaños de abertura, si las condiciones geológicas exigen esta variación.

Cada ranura abierta comprendida entre dos alambres, tiene forma de V, como resultado del perfil especial de alambre que se utiliza para formar la superficie de la rejilla. Las aberturas en forma de V, con bordes exteriores aguzados, son más angostas en su cara exterior y se ensanchan hacia adentro. Se diseñan de tal manera, para que no se obstruyan. Cualquier grano de arena que pase por los aguzados labios de la abertura en V, fácilmente atraviesa la rejilla sin atascarse en ésta.

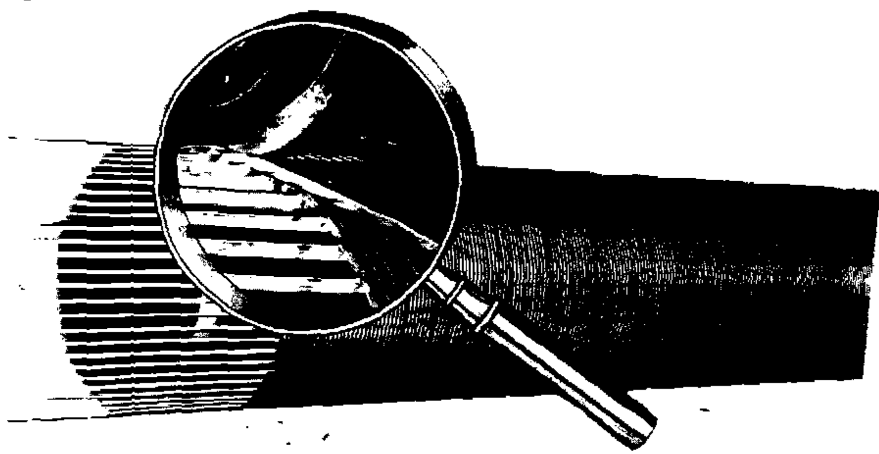


Fig. 104: Fabricación de la rejilla Johnson de ranura continua y soldadura global, para pozos de agua y de petróleo. La rejilla puede fabricarse de cualquier metal o aleación que sea resistente a la soldadura.

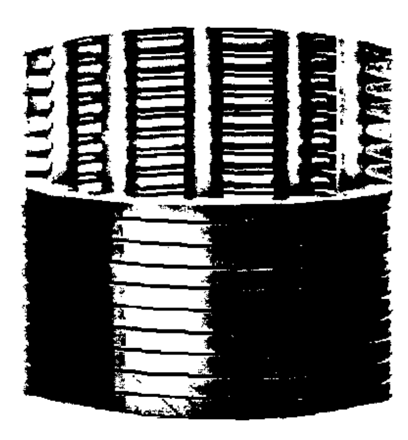


Fig. 105: Esta seccion de rejilla muestra el resistente diseño soldado, de ranuras abiertas continuas en forma de V.

El tipo de abertura de ranura continua le permite solamente dos puntos de contacto a cualquier grano de arena, de modo que las partículas individuales que sean retenidas por la rejilla no pueden obstruir las aberturas.

Las características que serían de desear en las aberturas de rejilla que se han descrito, tienen mucha importancia en el éxito al desarrollar un pozo y en el acabado de éste. Todo el principio del desarrollo de un pozo depende del paso de los tamaños menores de arena y limo a través de las aberturas de la rejilla, que es parte del trabajo de acabado de aquél. Estas aberturas deben ser tales que impidan la obstrucción y permitan completar satisfactoriamente el trabajo de desarrollo.

La rejilla de aberturas de ranura continua brinda más área de captación por metro cuadrado que cualquier otro tipo. Para un tamaño dado de abertura ranurada, esta rejilla ofrece el máximo porcentaje de área abierta.

Cualquier cantidad de agua fluye con más libertad a través de una rejilla de gran área abierta o de captación, que a través de otra en que ésta esté limitada. La velocidad de entrada a través de una área de captación mayor, es baja y esto implica que la pérdida de carga producida por la rejilla, es mínima. A su vez, ello hace que el abatimiento dentro del pozo se reduzca, para un determinado caudal de bombeo.

Por lo general, una área abierta grande y una velocidad reducida de entrada, alargan la vida útil de aquellos pozos que pudieren llegar a experimentar obstrucción debido a incrustaciones. La deposición de los materiales incrustantes, como ya se vió, se ve retardada cuando las velocidades del agua se mantienen bajas.

La influencia del área de captación de la rejilla en la eficiencia hidráulica del pozo y en las manifestaciones de la incrustación, se discutirá en detalle cuando se traten los tópicos referentes a diseño y mantenimiento de pozos.

Dos Series de Tamaños

Las rejillas de pozo de ranura contínua y de construcción soldada, se hallan disponibles en dos series de diámetros. Una de las series consiste de rejillas de diámetro telescópico. La otra corresponde a las rejillas hechas al tamaño de la tubería o rejillas de tamaño ID. La siglas ID se refieren al diámetro interior real.

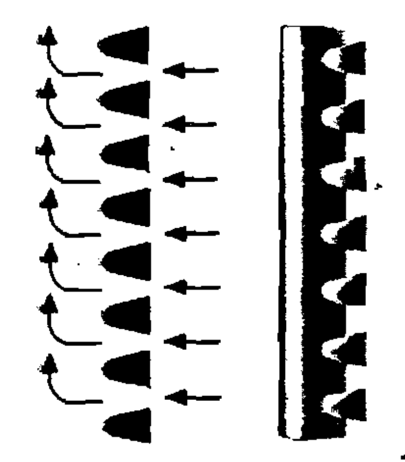


Fig. 106: Sección transversal de la pared de una rejilla para pozo Johnson y diagrama que indica el paso directo del agua a través de las aberturas en forma de V que no se obstruyen.

Tabla XIX
Rejillas de Pozo Johnson — Modelo Telescópico
Dimensiones en Pulgadas

Diámetro Nominal	Diámetro exterior real	Luz mínima interior	Accesorios roscados correspondientes al tubo*	Diámetro de la tubería de izado**
3	2¾	2	2" M or F	—
4	3¾	3	3" M or F	2
5	4¾	4	4" M or F	2½
6	5⅝	4⅞	5" M or F	3
8	7½	6⅝	6" M or F	4 or 5
10	9½	8⅝	8" M or F	5 or 6
12	11¼	10⅜	10" M or F	6 or 8
14 OD	12½	11⅜	12" M only	8 or 10
16 OD	14¼	13⅜	14" M only	8 or 10
18 OD	16¼	15	16" M only	12
20 OD	18¼	17	—	12
24 OD	22⅝	21¼	—	12
30 OD	27¼	25½	—	12
36 OD	32	30½	—	12

*Máximas conexiones roscadas de extremo, de un diámetro exterior no mayor que la rejilla.
**Tamaño usual de la tubería para conectar a la zapata de izado

Las rejillas de tipo telescópico se colocan en el pozo deslizándolas a lo largo del ademe de éste, con lo cual la rejilla queda colocada a la manera de los tubos de un telescopio, de donde recibe esta designación. El diámetro de cada rejilla de este modelo es justamente el necesario para permitir la introducción de la misma a través del ademe. Las rejillas de este tipo se designan por su diámetro nominal.

Así por ejemplo, una rejilla del tipo telescópico para un pozo de 10 centímetros de diámetro, tendrá a su vez un diámetro exterior de 9.5 centímetros, con el objeto de garantizar su deslizamiento. La Tabla XIX ofrece las dimensiones y ciertos otros datos de la serie completa de diámetros en que se fabrica este tipo de rejillas de tamaño telescópico. El hacer descender la rejilla hasta su sitio por dentro del ademe del pozo, constituye el método más corriente de instalación, puesto que es el más seguro y eficiente.

La serie fabricada al tamaño de la tubería o serie ID, suministra rejillas que son del mismo diámetro interior de la correspondiente tubería de ademe de tamaño estándar. Estas rejillas se utilizan en aquellos casos en que el diseño del pozo requiere que ésta vaya unida directamente al ademe del pozo y cuando se desea mantener un diámetro constante en toda la profundidad del mismo. Estas rejillas se suministran generalmente con anillos para soldar en cada extremo y de este modo pueden soldarse fácilmente al tamaño correspondiente de tubo. También se encuentran disponibles accesorios de rosca para el extremo, pero las conexiones roscadas rara vez se usan en aquellos tamaños mayores de 12 pulgadas de diámetro interior.

La Tabla XX muestra las dimensiones y otros detalles de la Serie ID de rejillas para pozo.

Las rejillas para pozo de aberturas de ranura continua, se fabrican en prácticamente cualquier ancho de abertura de la ranura, desde 0.15 milímetros. Las

aberturas de las ranuras se designan por números que corresponden al ancho de la abertura en milésimas de pulgada. Por ejemplo, la abertura No. 10, corresponde a 0.010 pulgadas (0.25 mm). El tamaño de las aberturas debe seleccionarse de modo que se ajuste a la gradación de la arena del acuífero. Si el pozo va a ser dotado de un filtro de grava, la abertura de la ranura de la rejilla debe ser tal que retenga alrededor de 90 por ciento de la grava.

Rejillas del Tipo de Celosía

Este tipo de rejillas para pozo, contiene aberturas que en realidad forman hileras de celosías. Las aberturas pueden estar orientadas tanto a ángulo recto, como paralelamente al eje de la rejilla. Estas se practican en la pared de un tubo soldado mediante una operación de troquelado. El tamaño de la ranura o el ancho de la abertura, se establecen mediante la acción de un sacabocados que actúa contra un troquel, el cual limita la extensión hasta la cual el metal es estirado. Este proceso corta la pared metálica del tubo en un tanto igual a la longitud de cada abertura. El número de tamaños de abertura que se pueden hacer, depende de la serie de troqueles de que disponga el fabricante. Resulta poco práctico el uso de un rango completo de aberturas.

La forma de las aberturas tipo celosía es tal que esta rejilla no se puede usar con éxito en pozos desarrollados naturalmente. Las aberturas se bloquean durante un proceso de desarrollo en el cual el material del acuífero contenga una apreciable cantidad de arena. Por lo tanto, el uso de este tipo de rejilla queda limitado casi por completo a los pozos construidos con filtro de grava.

Debido a los apreciables espacios ciegos que quedan entre las aberturas contiguas, el porcentaje de área abierta de estas rejillas es reducido. Por lo general, se fabrican en tramos de 1.50 metros de longitud, los cuales se pueden unir por soldadura para constituir secciones más largas. Solamente

Tabla XX
Rejillas de Pozo Johnson — Modelo de Diámetro Interior
Dimensiones en Pulgadas

Diámetro Nominal	Diámetro Interior	Diámetro Exterior	Diámetro exterior del extremo c/rosca interna (hembra)*	Accesorios normales para conexiones de extremo roscado
2	2	2⅜	2¾	2" M & F
3	3	3¾	3¾	3" M & F
4	4	4¾	4¾	4" M & F
5	5	5⅝	5¾	5" M & F
6	6	6⅝	7-3/16	6" M & F
8	8	8¾	9⅛	8" M & F
10	10	10¾	11-5/16	10" M & F
12	12	12⅞	13½	12" M & F
14	13⅜	14¼	—	—
16	15⅜	16¼	—	—
20	19¼	20	—	—
24	23⅝	24½	—	—
30	29½	30½	—	—

*Dimensiones correspondientes a rejillas de acero inoxidable y Everdur; los accesorios roscados hembra para rejillas de hierro Armco y acero galvanizado, son ligeramente más grandes.

en casos especiales, se suministran conexiones roscadas para el extremo.

Las rejillas del tipo de celosía son hechas de varios materiales, incluyendo el acero templado, el acero inoxidable y el bronce Everdur.

Rejillas de Base Tubular

Las rejillas de base tubular se fabrican utilizando un tubo de acero perforado que sirve como núcleo, el cual se cubre con una funda de ranuración continua. Esta funda puede obtenerse mediante el arrollado de un alambre de sección transversal trapezoidal, colocado directamente sobre el tubo, o arrollandolo sobre una serie de barras longitudinales separadas como se desee, alrededor de la circunferencia exterior del tubo. Estas barras mantienen el alambre retirado de la superficie del tubo, logrando así que muy pocas de las aberturas de éste queden bloquedas. Este tipo de construcción resulta mucho más eficiente que el de la rejilla de arrollado directo sobre el tubo.

Una envoltura aún mejor se obtiene cuando una unidad integral y soldada, de rejilla, se hace deslizar sobre la pared exterior del tubo. Esta funda es más resistente y menos susceptible de rasgarse.

Este tipo de rejilla de pozo contiene dos grupos de aberturas. Las exteriores corresponden a las vueltas contínuas del alambre arrollado; las interiores consisten de los agujeros o perforaciones practicadas en el tubo que sirve de núcleo estructural.

El área total correspondiente a las perforaciones de la tubería es por lo general menor que la abertura formada por el alambre exterior, de manera que el comportamiento hidráulico del conjunto depende del porcentaje de área abierta de la tubería del núcleo. Por lo general, ese porcentaje es bajo.

La práctica más común en la fabricación de este tipo de rejillas, es la de usar como núcleo, un tubo de acero con una funda exterior de acero inoxidable, bronce o latón. Cuando una aleación de cobre o de acero inoxidable se pone en contacto con un tubo ordinario de acero, se producirá una acción electrolítica y tendrá lugar la corrosión del tubo. Este tipo de rejilla sufre a menudo el efecto de la corrosión galvánica, debido a su contrucción con dos metales diferentes. Una manera de evitar la acción electrolítica consiste en utilizar para el tubo del núcleo, el mismo metal que para la funda. El costo aumenta, pero el producto que resulta es más durable.

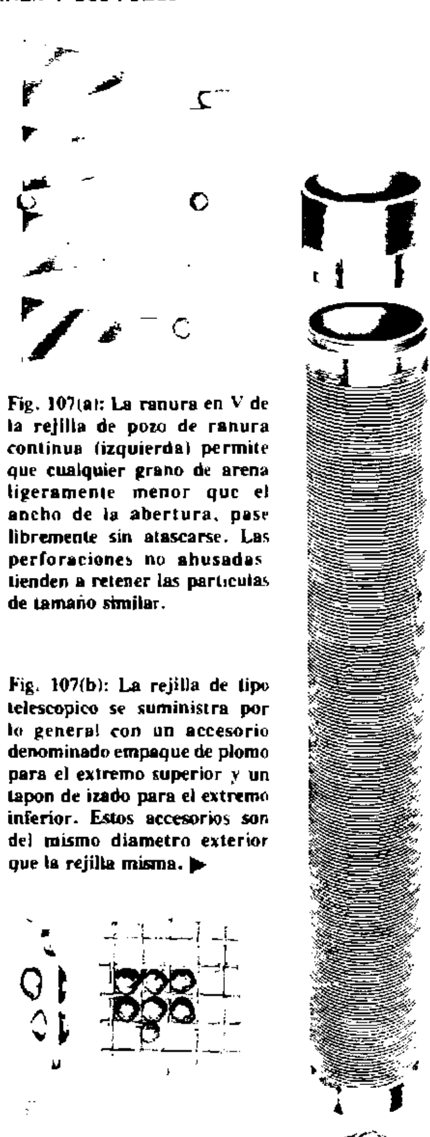


Fig. 107(a): La ranura en V de la rejilla de pozo de ranura contínua (izquierda) permite que cualquier grano de arena ligeramente menor que el ancho de la abertura, pase libremente sin atascarse. Las perforaciones no ahusadas tienden a retener las partículas de tamaño similar.

Fig. 107(b): La rejilla de tipo telescopico se suministra por lo general con un accesorio denominado empaque de plomo para el extremo superior y un tapon de izado para el extremo inferior. Estos accesorios son del mismo diametro exterior que la rejilla misma. ▶

Fig. 107(c): Las aberturas cuadradas de la malla de alambre y las circulares, cuando se perfora la pared de un tubo, se obstruyen fácilmente con aquellas partículas de tamaño similar. En las aberturas de ranura contínua, los granos sólo hacen contacto en dos puntos.

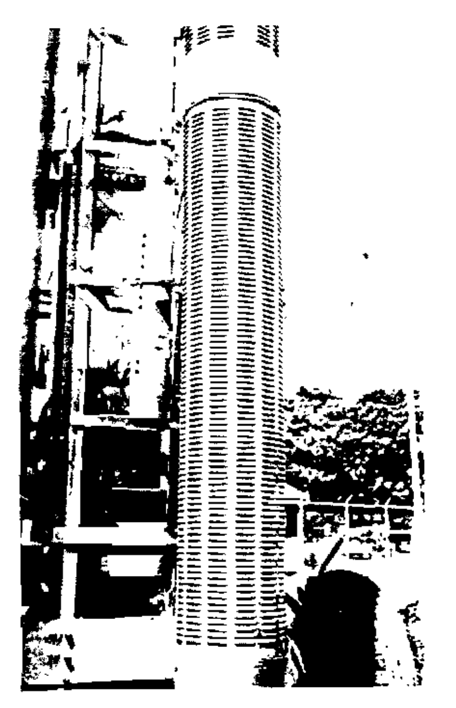


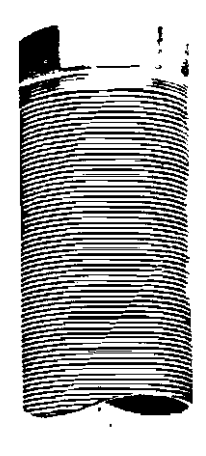
Fig. 108: La rejilla del tipo celosía se fabrica por lo general en tramos de 1.50m. Su aplicación se restringe solamente a pozos dotados de filtro de grava.

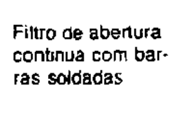
Punteras

Las punteras se fabrican en diversos tipos y tamaños. Los tamaños más comunes se diseñan para acoplarse directamente a tubería de 3 a 5 centímetros de diámetro.

La puntera de ranura contínua y de construcción soldada, se fabrica como un punzón de hincado agregándole al extremo inferior una punta de acero forjado y un vástago de tubería roscada en el extremo superior. Al igual que en los tamaños grandes de rejillas, este tipo de construcción es hidráulicamente el más eficiente. Soporta un fuerte hincado y no se deforma mientras se está clavando en el terreno.

La puntera del tipo de envoltura de latón,





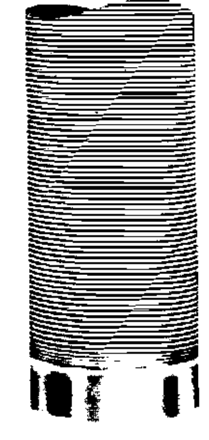


Fig. 109: Las rejillas hechas al tamaño de la tubería, del tipo soldado y de ranura contínua, incluyen tamaños que van desde 2 hasta 30 pulgadas (5 a 75 cm.), y en cada una el diámetro interior corresponde al de la tubería de acero estándar.

consiste de un tubo perforado recubierto con una malla de alambre de bronce. La envoltura de alambre se recubre a su vez con una lámina perforada de latón, para protegerla de cualquier daño. Las perforaciones practicadas en el núcleo tubular, disminuidas en área por el obstáculo que ofrece la envoltura de latón, constituyen el área efectiva de captación de este tipo de puntera. El extremo puntiagudo de acero forjado está dotado de una protuberancia anular diseñada para desplazar la grava o los cantos hacia un lado y reducir así el peligro de desgarramiento o de perforación de la funda, conforme la puntera se va hineando en el terreno.

Otro tipo de construcción de punteras utiliza un tubo de latón ranurado que se hace deslizar sobre otro tubo perforado de acero. El tubo de latón ranurado no se desgarra tan fácilmente, ni se daña, como la funda de malla de alambre. El área de captación es casi la misma que en la puntera enfundada en malla.

En las punteras recubiertas con malla, los tamaños de las aberturas de la rejilla se designan por el tamaño de la malla y en términos del número de aberturas por centímetro o pulgada lineal. Los tamaños más comunes son los que corresponden a los números 40, 50, 60 70 y 80, que en este caso se refieren a pulgada lineal.

En las punteras que contienen aberturas del tipo de ranuración, los tamaños de las aberturas se designan con los números que corresponden a la abertura real de la ranura, en milésimas de pulgada. Así pues, la ranura No. 10, es de un ancho de 0.010 pulgadas, las No. 12 equivale a un ancho de 0.012 pulgadas y así sucesivamente.

Tubería Ranurada

La tubería que contiene ranuras producidas por cualquier medio, se usa como un sustituto improvisado de una rejilla de pozo. Las aberturas pueden consistir en ranuras cortadas con una sierra, ranuras producidas por un soplete de oxiacetileno, ranuras formadas mediante un punzón y un troquel, o la perforación basta obtenida con un perforador de ademe. El perforador de ademe de pozos es una herramienta que se utiliza en el campo para producir aberturas

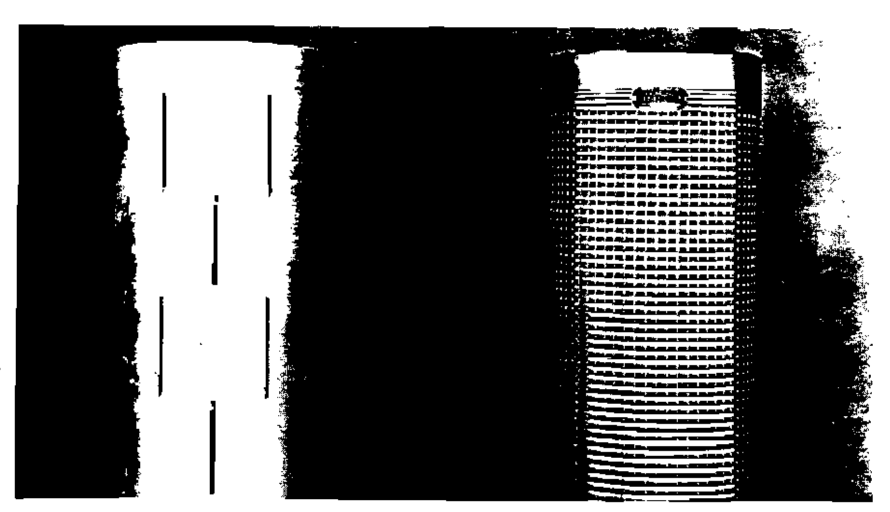


Fig. 110: Comparación entre una tubería ranurada y una rejilla de pozo, ambas de acero inoxidable y con el mismo ancho de abertura, que muestra cómo la rejilla de abertura ranurada continua, dispone de 10 veces más área abierta por metro lineal o por metro cuadrado, de superficie lateral.

en tubería de acero, una vez que el ademe se ha hecho descender dentro del pozo a través de la formación granular acuífera.

Las limitaciones más importantes de la tubería perforada son las siguientes: (1) las aberturas no son lo suficientemente próximas; (2) el porcentaje de área abierta es bajo; (3) las aberturas son inexactas y varían de tamaño; (4) las aberturas suficientemente pequeñas, que a veces se necesitan para controlar el paso de arena fina y media, resultan difíciles, si no imposibles, de obtener.

Desde luego, la tubería ranurada no es resistente a la corrosión, y la mayor parte de los procedimientos que se emplean para perforar el tubo aceleran el ataque corrosivo sobre el metal, cuando el agua es agresiva.

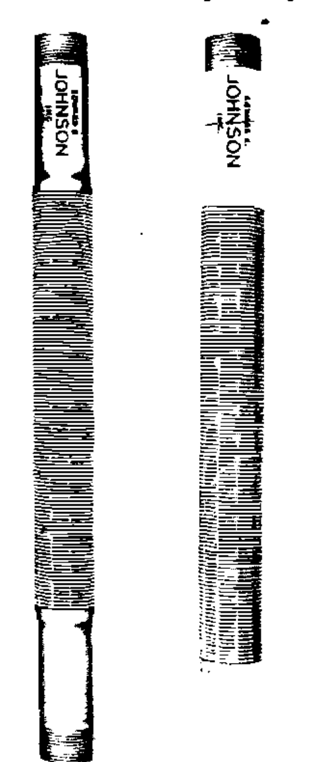


Fig. 111: Punteras y tramos de extensión, que ostentan las mismas características favorables de las rejillas soldadas de mayor tamaño.

Los bordes mellados y las superficies de las ranuras son susceptibles de una corrosión selectiva.

Los ensayos han demostrado la mayor eficiencia de las rejillas comerciales de pozos, al compararlas con la tubería ranurada. Una de estas pruebas, publicada por una agencia gubernamental de Illinois, permitió la comparación de una rejilla improvisada, de ranuras hechas con soplete, sobre un tubo de acero de 6 m. de longitud y 30 cm. de diámetro, con una rejilla comercial de 3 m. de largo y 20 cm. de diámetro.

Se perforó un pozo de 30 cm. de diámetro y la tubería ranurada de 6 m. se introdujo en éste, hasta enfrentarla a la formación granular productora. El pozo fue probado a un caudal de 380 litros por minuto. Luego se instaló la rejilla de pozo de 20 cm. de diámetro y 3 m. de longitud por dentro del tubo perforado y éste se extrajo para dejar la rejilla expuesta dentro del acuífero. El pozo se probó nuevamente, esta vez a razón de 760 y 1140 litros por minuto. En la Tabla XXI pueden verse los resultados.

El área total abierta de la rejilla de 3 m. era de varias veces la correspondiente al tubo perforado de 6 m. Una comparación de las capacidades específicas obtenidas, demuestra que la eficiencia de la rejilla de 3 metros, fue de 4 a 6 veces mayor que la de la tubería ranurada.

El tubo plástico ranurado también se usa en algunas partes como un sustituto de la rejilla de pozos. El uso del plástico se limita a pozos de pequeño diámetro debido a la baja resistencia del material. La resistencia de la tubería de material plástico es de un sexto a un décimo de la que corresponde a las rejillas de acero inoxidable o bronce Everdur.

Otro problema que se relaciona con la poca resistencia del tubo plástico, es el de la dificultad de obtener accesorios adecuados para sus extremos. Los accesorios de que normalmente se dispone para la tubería plástica no permiten manipular el material

Tabla XXI
Comparacion entre Tubo Ranurado y Rejilla de Pozo

Especie	Caudal de Bombeo (litros por minuto)	Abatimiento Total (metros)	Capacidad Específica (litros min./m)
Tubo ranurado	380	2.3	165
Rejilla	760	0.76	1.000
Rejilla	1.140	1.70	670



Fig. 112: El perforador de ademe produce aberturas melladas, bastas y de tamaño variable.

por los métodos y herramientas convencionales que se emplean en la mayoría de las operaciones de perforación de pozos.

La tubería plástica ranurada ofrece muy bajo porcentaje de área abierta, estando sujeta, en este aspecto, a las mismas limitaciones de la tubería ranurada de acero.

Los Ensayos de "Coos Bay"

Mediante el empleo de tres pozos de prueba localizados en Coos Bay, Oregón, se estableció una comparación del comportamiento de aquéllos, al instalárseles tanta tubería ranurada como rejilla comercial de pozo. La Pacific Power and Light Company construyó los pozos de prueba en 1958, como parte de una investigación del potencial de agua subterránea de un extenso acuífero de la



Fig. 113: En la tubería ranurada con soplete de flama, el porcentaje de área abierta es bajo y el ancho de las ranuras muy grande, como para permitir que el desarrollo del pozo elimine la arena.

Costa del Pacífico, constituído por arena fina.

El primer pozo tiene un acabado de 24 metros de tubería ranurada de madera de 30 cm. de diámetro, con 170 ranuras por metro, centrada en un agujero de 91 cm. de diámetro y perforado por el método de circulación inversa. La tubería perforada se rodeó de un doble filtro de grava, en el que el más fino de los dos anillos de grava especialmente gradada, se colocó contra la formación natural, y el más grueso contra la tubería ranurada. Este esquema se adoptó para que las ranuras de la tubería pudieran ser tan grandes como fuera posible, sin permitir que la grava del filtro pasara al ademe. Sin embargo, el doble filtro de grava causó problemas al desarrollar el pozo. Se emplearon unos 10 días en desarrollarlo hasta su máximo rendimiento. El pozo ya completado se probó a un caudal de 77.2 m³/hora, habiéndose obtenido un abatimiento de 15.5 metros.

El segundo pozo se completó con 15 metros de rejilla del tipo de ranura continua, de 25 cm. de diámetro y de abertura No. 10, 0.010 pulgadas (0.254 mm) y se diseñó como un pozo naturalmente desarrollado. El pozo se perforó mediante el método de percusión. El desarrollo se obtuvo mediante pistoneo durante unas 3 horas de labor. Este pozo se probó a razón de 91.5 m³/hora, con un abatimiento de 6.86 metros.

El tercer pozo fue terminado con una rejilla de ranura continua, de 25 cm. de diámetro y 15 metros de longitud y con aberturas de tamaño No. 30 (0.030 pulgadas) o sea, 0.762 mm. Este pozo se diseñó para probarse con filtro de grava y rejilla centrada en un agujero de 40 cm. perforado por el método de percusión. Unas 4 horas tomó el desarrollar el pozo mediante pistón. La prueba de bombeo a 91.5 m³/hora, indicó un abatimiento de 6.28 metros.

La Tabla XXII ofrece una comparación de los resultados obtenidos, en términos de capacidad específica.

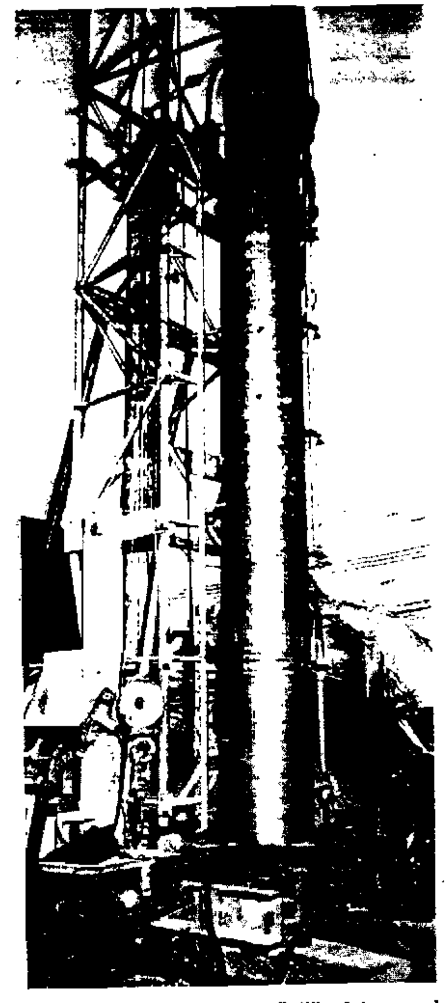


Fig. 114: Instalación de una Rejilla Johnson, de acero inoxidable, dentro de un pozo perforado por el método rotatorio de circulación inversa.
Cortesía de C. W. Lauman Co., Inc.

El análisis de las muestras de arena tomadas durante la perforación de los tres pozos, mostró que el acuífero era esencialmente el mismo en todos los sitios.

El área abierta que sería de desear en una rejilla de pozo, es aquélla que sea por lo menos igual al porcentaje de vacíos o porosidad de la formación granular acuífera, o del filtro de grava soportado por la rejilla. Esta regla se deriva de una simple lógica.

Tabla XXII
Comparación de los Pozos de Coos Bay

Sistema de Rejilla	Longitud de la Rejilla, en metros.	Tipo de Pozo	Diámetro del pozo en cm.	Capacidad específica en m³/hora/m.
Tubo Ranurado	24	Doble filtro de grava	91	4.98
Rejilla de abertura No. 10	15	Naturalmente desarrollado	25	13.34
Rejilla de abertura No. 30	15	Un solo filtro de grava	40	14.57

Supóngase que cierta arena contiene un 30 por ciento de vacíos o porosidad y que una rejilla instalada en el pozo tiene un 10 por ciento de área abierta. La diferencia representa una constricción del flujo conforme el agua penetra al pozo. Esto significa un mayor abatimiento, puesto que se produce una pérdida adicional de carga con el movimiento del agua a través de las aberturas de la rejilla.

En un pozo que se haya desarrollado en forma natural, el área abierta de la rejilla realmente excede de la porosidad del material acuífero no alterado. El desarrollo del pozo aumenta la porosidad del acuífero en los alrededores de la rejilla. En consecuencia, el área abierta de ésta debería ajustarse a la porosidad obtenida mediante el desarrollo si se quiere evitar la constricción del flujo.

Se han emitido conclusiones diciendo que no se obtiene ventaja adicional cuando el área abierta de la rejilla excede de un 15 a un 20 por ciento. Estas conclusiones se basan solamente en ensayos de laboratorio, en que las rejillas se han rodeado de unos pocos centímetros de grava y todo el conjunto se ha sumergido en un tanque de agua abierto

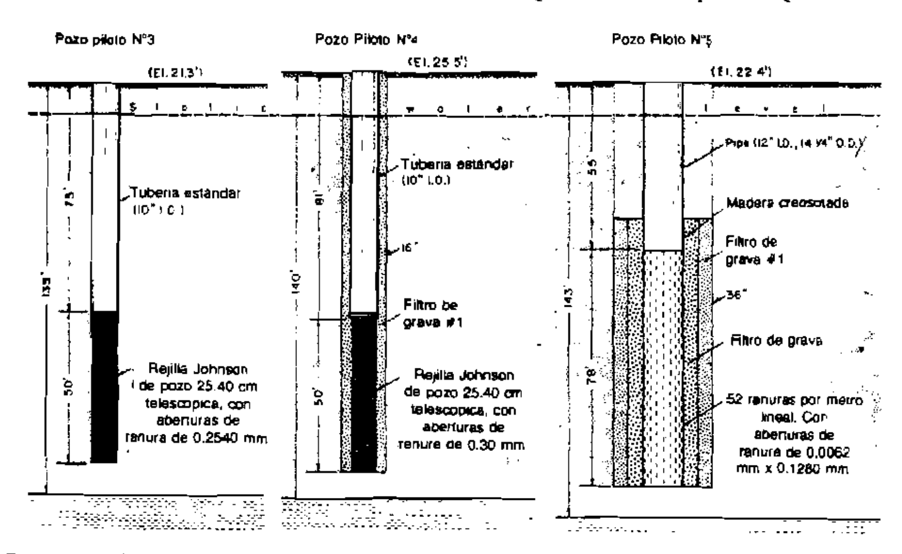


Fig. 115: Detalle de los pozos que se construyeron en Coos Bay con el objeto de comparar su comportamiento y costo de construcción. Todos los pozos fueron sometidos a ensayos completos y de larga duración después de ser completados. El pozo acabado con tubería ranurada fue el de más baja producción, y su costo global resultó ser el mayor.

Tales ensayos no se pueden considerar como representativos del comportamiento de una rejilla cuando ésta se instala en un pozo.

En la práctica en sitio, la experiencia ha probado que el límite de 15 a 20 por ciento que los ensayos de laboratorio reclaman haber demostrado, constituye a menudo una guía falsa para seleccionar una rejilla. Los pozos enrejillados se comportan óptimamente cuando el área total de captación es la mayor posible para un tamaño dado de abertura y para los requisitos exigidos de resistencia.

En aquellos pozos que interceptan formaciones de arena fina, no es posible obtener una rejilla cuyo porcentaje de área abierta sea equivalente al porcentaje de porosidad de la arena. El tamaño de las

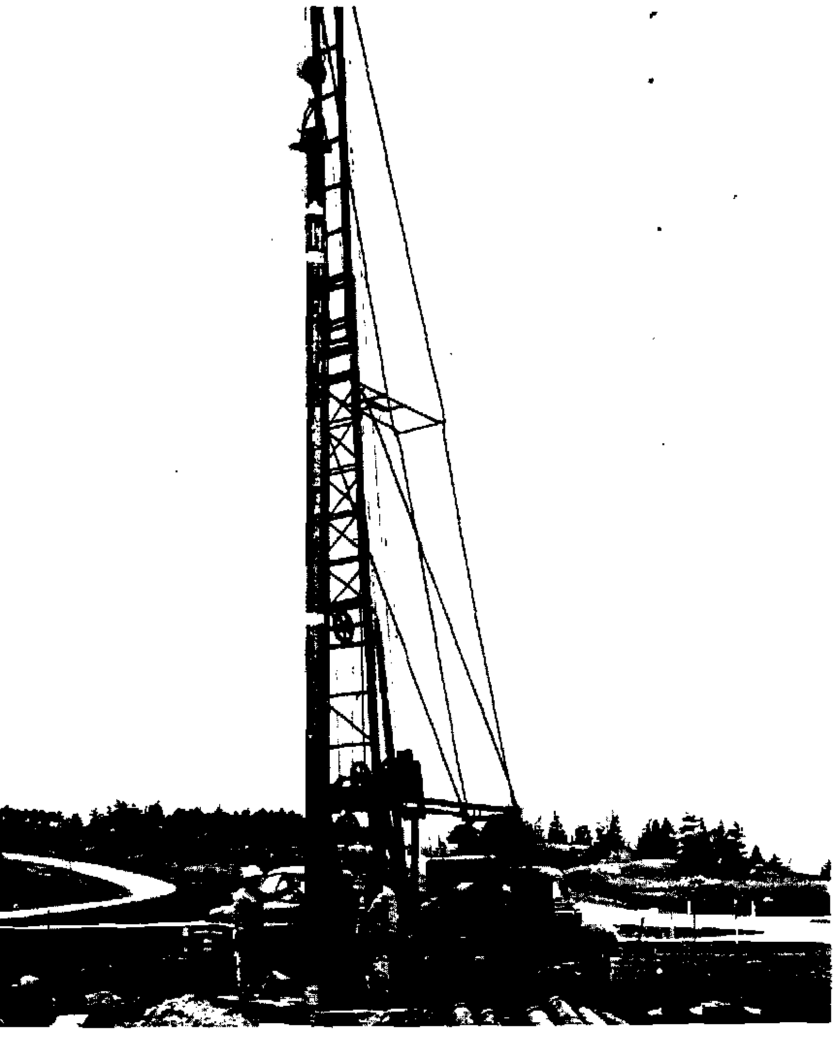


Fig. 116: Instalación de una rejilla de pozo Johnson, de metal Everdur, en un pozo perforado por el sistema de percusión, para una gran pista de prueba de automóviles. *Cortesía de O. C. Corsaut Co.*

aberturas que se requiere para regular la entrada de arena fina es a menudo tan pequeño, que aún la mejor rejilla de ranura continua fallaría en brindar el porcentaje óptimo de área abierta.

Por ejemplo, si se necesitan ranuras de una abertura No. 10 (0.010 pulgadas), la rejilla más eficiente de construcción soldada brindará solamente un poco más de 14 por ciento de área abierta. Algunas otras rejillas menos eficientes, sólo alcanzarán un poco menos de 10 por ciento de área abierta. Una tubería ranurada improvisada con dificultad llegará a tener un 2 por ciento de área abierta. En tanto que ninguna alcanzará el 25 a 30 por ciento de abertura equivalente a la porosidad de la formación granular, la rejilla soldada es la que más se aproxima a la magnitud requerida

Por más eficiente que sea un perforador al perforar y enrejillar un pozo, nunca podrá éste alcanzar óptimos resultados si emplea una rejilla de diseño pobre. Es de la máxima importancia que la rejilla se fabrique al tamaño o tamaños correctos de abertura de las ranuras, que se ajusten a la gradación de la arena, o de la grava y arena que constituyen la formación acuífera.

Esto resulta tan esencial como las otras características básicas de las rejillas de ranura continua que proveen máxima área de entrada, aberturas en V no atascables y máxima resistencia obtenida mediante construcción soldada.

Capitulo 8

Exploración de Agua Subterránea

EL TÉRMINO agua subterránea no se refiere a una agua cualquiera que se halle por debajo de la superficie del terreno. Es el agua que se encuentra en las rocas, sean éstas consolidadas o no, y que son suficientemente permeables como para permitir que cantidades apreciables de agua se desplacen hacia los pozos. Aquella parte de toda el agua subsuperficial que propiamente se denomina agua subterránea, ha sido definida en detalle en el Capítulo 2.

En cualquier lugar existe siempre alguna cantidad de agua por debajo de la superficie del terreno. Sin embargo, el localizar agua subterránea significa establecer dónde ésta tiene lugar en condiciones tales que permitan su rápido acceso a un pozo para que realmente sea de utilidad. Las maneras prácticas de conseguir lo anterior, incluyen la aplicación de conocimientos científicos, experiencia en perforación de pozos y sentido común.

Las categorías de las formaciones geológicas en las que el agua subterránea se manifiesta, han sido descritas por geólogos, hidrólogos y perforadores de pozos, en centenares de publicaciones. La información así divulgada representa lo que ellos han aprendido a través de sus propias experiencias y las de algunos otros que han estudiado el agua subterránea alrededor de todo el mundo.

Los siguientes párrafos, tomados de un reciente informe[1] del Servicio Geológico de los Estados Unidos, nos describe el enfoque general de una exploración de agua subterránea.

"Hay ciertas guías que son de utilidad en la localización de abastecimientos de agua subterránea. Por ejemplo, el agua subterránea tiende a manifestarse en mayores cantidades debajo de los valles que por debajo de las colinas. En las regiones áridas, ciertas plantas que tienen predilección por el agua nos dan el indicio de que debe haber agua subterránea a profundidad somera, que las alimenta. Cualquier área en donde el agua se manifiesta en la superficie, ya sea en la forma de manantiales, percolaciones, pantanos o lagos, ha de contener algo de agua subterránea, aunque no necesariamente en grandes cantidades o de calidad utilizable.

Pero las guías más valiosas son las rocas. Los hidrólogos y los geólogos utilizan la

palabra roca para referirse tanto a las formaciones duras y consolidadas, tales como la arenisca, la caliza, el granito o la lava, como también a aquellos sedimentos no consolidados como la grava, la arena y la arcilla. Ellos usan la expresión *acuífero* para definir un estrato de roca que contenga una cantidad utilizable de agua. La grava, arena, arenisca y la caliza son los mejores acuíferos, pero estas rocas constituyen solamente una fracción de todas las rocas contenidas en la corteza exterior de la tierra. No todas ellas erogan suficientes cantidades de agua. El grueso de las rocas consiste de arcilla, lutita y rocas cristalinas, un término este último que se utiliza para designar a una crecida variedad de rocas que forman la parte mayor de la corteza terrestre. La arcilla, la lutita y las rocas cristalinas son todas malos productores, pero pueden rendir agua suficiente como para usos domésticos, en aquellas regiones en donde no se encuentran buenos acuíferos.

"Lo primero que hacen los hidrólogos y los geólogos es preparar un mapa geológico y unas secciones transversales que muestren los sitios de afloramiento de las diferentes rocas y la manera cómo éstas se distribuyen por debajo de la superficie. Ellos observarán luego cómo han sido afectadas las rocas por presiones terrestres en el pasado. El mapa geológico, las secciones y las explicaciones complementarias, mostrarán qué rocas son susceptibles de contener agua y en dónde se hallan éstas por debajo de la superficie del terreno.

"A continuación, ellos deberán obtener toda la información posible que exista sobre pozos existentes, su localización, profundidad, profundidad del nivel del agua, cantidad de agua que se extrae por bombeo y qué clase de rocas fueron penetradas por estos pozos. Gran parte de su interés radica en aquellos hechos que se manifiestan por debajo de las profundidades ordinarias de excavación, pero por lo general, no se puede perforar un pozo en cada lugar en que se necesite información.

"Los registros de pozos en que el perforador ha anotado la profundidad y los diferentes tipos de rocas y estratos, resultan de gran utilidad. Un registro realmente útil de un pozo deberá de incluir lo siguiente: muestras de roca; información referente a cuál estrato rinde agua y cuán libremente, nivel estático del agua en cada estrato sucesivo, progresivamente más profundo; y los datos de cualquier prueba de bombeo o de cuchara, mostrando cuánta agua se obtuvo y cuánto descendió el nivel para una razón dada de bombeo o de cuchareo.

"El hidrólogo confeccionará luego un mapa de los contornos de igual nivel de la superficie freática . . . midiendo la profundidad desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua en los pozos. A continuacion determinará, ya sea mediante un mapa topográfico o por nivelación, cuán alto se halla el terreno sobre el nivel del mar. Finalmente, trazará líneas que conecten todos los puntos en que la elevación del nivel del agua sea la misma, de modo que el mapa muestre la forma de la superficie freática, de la misma manera en que un mapa topográfico indica la forma de la superficie del terreno.

"El mapa de curvas equipotenciales es de especial importancia porque revela no sólo la profundidad a que el agua se halla almacenada, sino también la dirección en que ésta se desplaza. Si la superficie freática tiene alguna pendiente, el agua se moverá en esta dirección.

"Cuando no hay pozos o no se ha obtenido información suficiente de los existentes, el hidrólogo se ve obligado a perforar algunos agujeros de prueba. Las muestras de material geológico que se obtengan mediante perforación, se examinan y analizan para determinar cuál estrato es acuífero y cuán extensamente subyace.

"En consecuencia, la labor del hidrólogo no es de carácter mágico. Se basa en el

sentido común y en la observación científica. El utiliza todos los indicios que pueda obtener, lo que pueda observar de las rocas en sus afloramientos en la superficie del terreno, en cortes de carretera, en canteras, túneles o minas y lo que los pozos le puedan revelar.

"Estos estudios de agua subterránea serán tan completos como su finalidad lo exija. Si lo que se necesita es un abastecimiento doméstico de agua, una área como la de un condado puede ser estudiada en una estación del año. El informe y los mapas se prepararían en la estación siguiente.

"El informe y los mapas del hidrólogo mostrarán dónde se puede obtener agua, qué clase de agua existe químicamente y, de un modo muy general, cuánta hay disponible. Si se requiere un gran abastecimiento o si se presentan problemas con el suministro actual, se deberán realizar estudios más detallados, tanto en aquella área en donde las mayores necesidades existen, o en algunos casos, donde se prevean necesidades futuras. Cualesquiera que sean los alcances del estudio, el informe debe constituir una base firme para lo que sigue después, ya sea que esto consista en perforar pozos para uso doméstico o agropecuario, o proyectos de abastecimiento urbano en gran escala, industriales, o de riego."

Otros datos importantes son los referentes a la recarga y descarga natural de un acuífero. ¿En dónde se hallan las áreas de recarga con relación a la localización propuesta de los pozos? ¿Cuánta agua puede penetrar al acuífero bajo diversas condiciones de precipitación y uso de la tierra?

Antes de extraer agua de un acuífero mediante pozos, la recarga y la descarga natural se hallan balanceadas con respecto al ciclo climático. El bombeo por pozos aumenta la descarga total del sistema y altera el balance hidrológico. La recarga deberá aumentar o la descarga natural disminuir, para reajustarse a las nuevas condiciones. En un programa exploratorio de aguas subterráneas, resulta importante estimar la magnitud de estos dos factores cuando se desea construir pozos de gran capacidad o una cantidad grande de éstos. El bombeo de pozos puede aumentar sólo temporalmente la descarga total de un acuífero, si tiene lugar

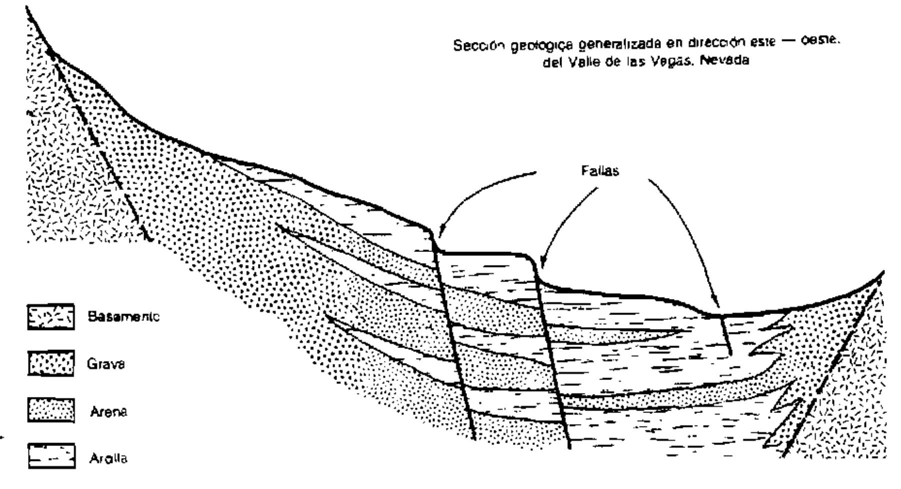


Fig. 117: Sección geológica derivada de estudios referentes a hechos que se manifiestan en la superficie, topografía, cortes expuestos, excavaciones, inventario de pozos existentes y perforaciones de investigacion. *(Boletín de Recursos Hidráulicos de Nevada, No. 5)*

una disminución de la descarga natural que restituya el balance hidrológico. No importa que el programa de exploración de agua subterránea sea grande o pequeño, una comprensión total de los principios fundamentales del movimiento y la manifestación del agua subterránea, resulta de importancia capital. Por lo tanto, algunas partes pertinentes del Capítulo 2 deberán leerse conjuntamente con los métodos específicos que se describen en este capítulo.

Perforación Exploratoria

El método más seguro para conocer las características de las formaciones que yacen por debajo de la superficie del terreno, es el de perforar a través de éstas, obteniendo de este modo muestras geológicas mientras se perfora y llevando un registro litológico del agujero. El *registro litológico* consiste en anotar las propiedades características de los estratos, en función de su profundidad.

Se puede obtener uno cualquiera de los diversos tipos de registros de pozos. El más común es la descripción que el perforador hace del carácter de cada estrato, la profundidad a la cual se observaron los cambios litológicos, el espesor del estrato y la profundidad del agua.

En ciertas condiciones también se pueden obtener tanto un registro eléctrico como otras formas de registros geofísicos. Algunos de éstos se describen más adelante en este mismo capítulo.

Las muestras de materiales sub-superficiales que se obtienen durante el proceso de perforación, constituyen en la mayor parte de los casos, la mejor fuente de información geológica e hidrológica. La finalidad principal al perforar agujeros de prueba, es la de obtener muestras que revelen el carácter, la profundidad y el espesor de los diversos estratos.

Lo ideal sería que el perforador recogiera muestras representativas a profundidades determinadas y a intervalos tales, que se pudiera mostrar el carácter litológico completo de la formación que se ha penetrado. El método de recuperación de núcleos que se puede emplear cuando se está perforando dentro de rocas consolidadas, es el que más se aproxima a esa condición ideal. Le siguen los métodos de embutir núcleos que se aplican cuando se perfora en materiales suaves o no consolidados.

Las muestra que usualmente se obtienen por otros sistemas, son los cortes que resultan de la acción del barreno. Aunque no son completamente representativos de la formación que se ha penetrado, son por lo general bastante confiables en las exploraciones de agua subterránea.

Cuando se perfora con el método de rotación, el recolectar muestras razonablemente representativas requiere de una considerable experiencia y atención, incluyendo experiencia en la misma localidad en donde se estan buscando los datos referentes al agua subterranea. Los registros geofísicos se aplican fácilmente en los agujeros perforados por el método de rotación, pero ello únicamente suplementa la operación de muestreo, sin llegar a sustituirla jamás. De heeho, debe disponerse de algunas muestras que sirven como hitos de verificación, cuando se está interpretando el registro geofísico.

La perforación exploratoria se efectúa con el propósito de lograr dos objetivos: el trabajo puede constituir una parte del estudio hidrogeológico de una área, o una fase preliminar del diseño y construcción de uno o más pozos en un sitio particular. Cuando se trata del estudio de una área, los agujeros de investigación se emplazan para verificar o suplementar la información que se haya obtenido por otros cauces a los que nos hemos referido en la discusión anterior. Cuando se está explorando en un lugar determinado, para obtener datos que específicamente se requieren para el diseño de pozos, se necesita darle una atención detallada al muestreo de los materiales

acuíferos y a la fidelidad de los registros de pozos.

Se necesita también realizar una prueba de acuífero, mediante el bombeo de algún pozo de prueba, tal como se describió en el Capítulo 5. La instalación de los pozos que demanda esta prueba forma también parte del trabajo exploratorio.

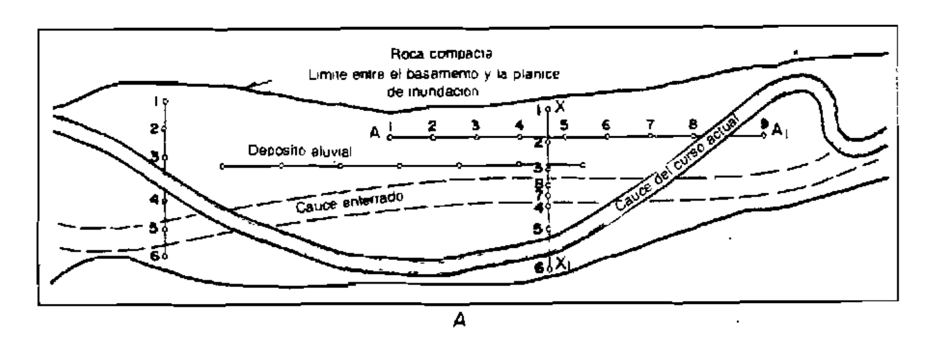
Las ventajas relativas de diversos métodos de perforación investigativa, varían considerablemente. Cada método cuenta con sus ventajas y desventajas, que dependen de las condiciones geológicas locales. Ninguno es superior en todas las situaciones.

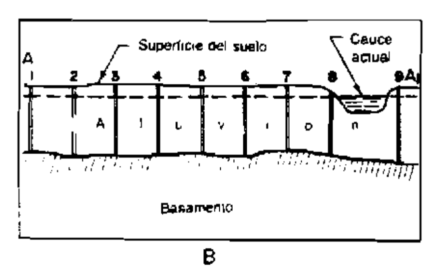
Métodos de Perforación Investigativa

El método convencional de rotación resulta a menudo más rápido y más económico cuando se perfora en formaciones no consolidadas, que no contienen guijarros o cantos rodados. La ventaja del método de rotación crece conforme se perfore más profundamente en tales materiales. Una de las desventajas más generalizadas en el método de rotación, es la de que en un agujero de prueba perforado por este método, el nivel estático del agua por lo general no se puede medir a menos que se instale un ademe y se extraiga gran parte del lodo de perforación.

Cuando la profundidad es moderada, se prefiere por lo general el sistema de percusión; igualmente cuando se está perforando en calizas cavernosas, basalto o en toba dura. El muestreo de materiales no consolidados por el sistema de percusión, ofrece dificultades comparativamente pequeñas. Se necesita mucho menos agua para la operación de perforación, factor muy importante cuando el agua debe ser traída de lejos.

En años recientes, se ha usado un método combinado de percusión y rotación, con herramientas impulsadas por aire comprimido, que logra penetrar rápidamente





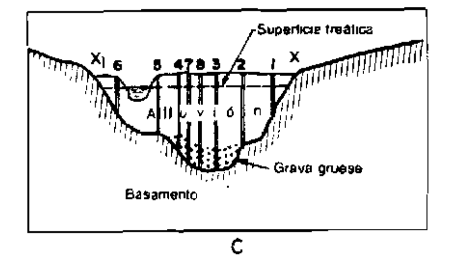


Fig. 118: Una línea de agujeros de prueba transversal a un valle, es más adecuada para revelar importantes variaciones en el espesor del material aluvial, que una serie de perforaciones a lo largo de aquél.

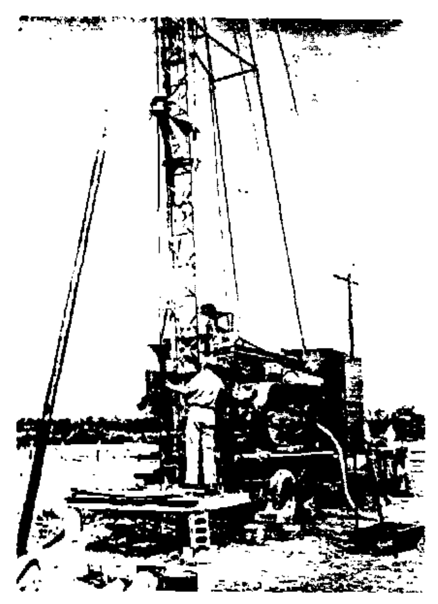


Fig. 119: Agujero de prueba perforado con equipo de percusión. La herramienta de la izquierda es una cuchara típica que se utiliza para obtener muestras de la formación.

en las formaciones consolidadas. Este método funciona bien en diámetros de hasta 15 cm. que por lo general es adecuado al tamaño de los agujeros de investigación. Con este equipo puede usarse la circulación convencional de lodo, cuando se está perforando en rellenos no consolidados situados sobre el basamento.

El método de circulación inversa no se adapta bien a la perforación de investigación. El diámetro mínimo en que se puede perforar con el método de circulación inversa, es de unos 40 a 50 centímetros. En regiones en donde se usan los equipos de circulación inversa para perforar pozos de producción, se emplean herramientas rotatorias con lodo para los pozos de prueba.

Los barrenos en espiral se emplean con éxito en la perforación de agujeros de investigación para estudios de fundaciones de puentes y otras estructuras. Cuando se mejoren los modelos de este tipo de herramienta, probablemente se utilicen con más frecuencia en la exploración de aguas subterráneas.

En las perforaciones de prueba se busca primordialmente obtener lo siguiente.

1. Identificación y localización del sitio de cada agujero.
2. Un registro de los estratos penetrados, denominado el registro del pozo.
3. Muestras representativas de los estratos que se han penetrado.
4. Profundidad del nivel estático del agua en cada estrato.
5. Muestra de agua de los acuíferos potenciales.

El registro deberá incluir descripciones, profundidades y espesores de todos los diferentes estratos, tanto acuíferos como no acuíferos, que han sido penetrados durante la perforación. Las diversas observaciones hechas por el perforador deberán incluirse en el registro. El perforador debe describir, claro está, las muestras de perforación, pero antes de que efectivamente las observe, la misma acción de la perforación le brinda una idea del carácter de la formación y especialmente de la profundidad a la cual se ha encontrado un cambio en ésta.

Cuando se perfora con el método de rotación, por ejemplo, la acción es suave si se trata de una arcilla o de una lutita. Una vibración o un rechinar ocasional podría indicar la presencia de partículas de grava dentro de una arcilla o de material de arrastre glacial o alguna concreción en una lutita. Una vibración y rechinar continuos, indicará por lo general, que se trata de arena y grava y de areniscas. En un estrato de arena fina, tiene lugar una perforación de acción suave pero de rápida penetración.

Cuando se perfora por medio del sistema de percusión, el perforador experimentado puede a menudo estimar el carácter de la formación con sólo sentir al tacto el cable de las herramientas. Las observaciones del nivel del agua dentro del pozo, indican si el material que se encuentra justamente por debajo del ademe, es impermeable como la arcilla, si está absorbiendo agua como la arena seca o cede agua al agujero como lo haría una arena saturada. La medida de hasta dónde la arena se desplaza o se mueve dentro del ademe, como lo haría un fluído, brindará una idea de cuán suelto o compacto es un acuífero. Una arena compacta no subiría; otra que esté suelta, puede subir tanto, que complica la perforación.

Registro Cronológico de la Perforación

El registro cronológico de una perforación es una valiosa ayuda para evaluar la información que se obtenga de un agujero de prueba perforado por el método rotatorio. Al mismo tiempo constituye un registro preciso del tiempo consumido en la perforación de cada metro de profundidad.

Este tipo de registro brinda información sumamente útil relativa a las formaciones, puesto que el carácter del material que está siendo penetrado por la perforación, determina en gran parte la velocidad con que éste prosigue. Cualquier perforador se da cuenta de si la velocidad de penetración aumenta o disminuye e interpreta este hecho en alguna forma; sin embargo, muchos ignoran el valor que tiene un registro sistemático del tiempo que se necesita para obtener cada metro de avance.

Algunos factores ajenos al carácter de cada formación afectan también la velocidad perforación. Algunos de éstos, son el peso del trépano, afilado del mismo, diámetro del agujero, tipo de trépano, velocidad del agua a través de las boquillas de éste y velocidad de la rotación. Para obtener los mejores resultados, estos factores deben mantenerse casi constantes, de modo que la perforación prosiga en condiciones razonablemente uniformes. Los registros cuidadosos de tiempo muestran, sin embargo, que ninguno de estos factores mecánicos influyen tanto en la velocidad de perforación como la textura de los estratos que se están penetrando. Esto último favorece la precisión del registro cronológico.

El peso del trépano aumenta conforme se profundiza el agujero ya que se van agregando barras de perforación. Sin embargo, la interpretación del registro cronológico es un asunto relativo y este aumento gradual del peso de la herramienta, no afecta seriamente la utilidad de los resultados. Si se utiliza algún empuje hidráulico cuando se están penetrando formaciones duras, debe anotarse la fuerza empleada y tomarla en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

Los estratos de arena limpia se perforan

Perfil cronológico de sondeo

Profundidad en pies		Tiempo de perforación min sec	Tiempo promedio por cada pie (0 Minutos 1 3 5)
219 ft	220	4' 05"	
	221	4' 10"	
	222	3' 50"	
	223	3' 55"	
	224	3' 48"	Arcilla guijosa
	225	4' 30"	
	226	4' 35"	
	227	4' 30"	
	228	4' 48"	
	229	4' 50"	
229	230	4' 50"	
	231	45"	
	232	52"	Arena lodosa
	233	12"	
	234	11"	
	235	08"	
	236	08"	
	237	07"	
	238	11"	
	239	12"	Arena gruesa limpia
239	240	12"	
	241	09"	
	242	12"	
	243	18"	
	244	12"	
	245	16"	
	246	23"	
	247	27"	
	248	42"	
	249	1' 06"	
249	250	42"	Arcilla grisácea
	251	1' 05"	
	252	1' 19"	

Fig. 120: El tiempo de perforación por unidad de penetración, si se plotea contra la profundidad, indica en dónde tienen lugar las variaciones de formación.

por lo general muy rápidamente. La arena con lodo, más lentamente. La arena suelta se perfora más rápidamente que la cementada. La arcilla, lutita, y la roca dura se perforan notablemente más despacio.

El registro cronológico de perforación, que consiste de una curva o diagrama que indica el tiempo gastado en cada metro de profundidad, pone de relieve todos los cambios en la velocidad de penetración. Cada cambio apreciable indica una diferencia en el material que se está perforando. Mediante el diagrama, se identifican tanto la parte superior como la inferior y el espesor de cada formación. Cuando se está perforando en una arcilla con intercalaciones de arena acuífera, el diagrama mostrará la posición y el espesor de cada lente de arena y el contraste de los lechos alternativos de arcilla

Métodos de Muestreo

Las muestras de roca consolidada únicamente sirven para identificar las formaciones encontradas a diversas profundidades. Sin embargo, las muestras obtenidas de formaciones no consolidadas, suministran datos básicos importantes para el diseño de pozos.

Cuando se está perforando por el método de percusión, la recolección de muestras de arena, grava y arcilla consiste en extraer con la cuchara el material que se obtiene conforme el pozo se va profundizando. Muchos perforadores prefieren bajar ademe en un intervalo corto y luego emplear la cuchara para limpiar el tapón de material que se forma por dentro de aquél, después de cada descenso. Puede que se necesite usar el barreno para aflojar y dispersar ciertos tapones compactos, antes de que el material pueda extraerse con la cuchara. Una penetración corta podría ser de alrededor de 30 cm. en arena intercalada o en arcilla o de varios metros en una arena gruesa.

Si la acción de la perforación hace que el ademe se continúe moviendo hacia abajo, esto debe de tenerse en cuenta para identificar la profundidad correcta a que se toma cada muestra.

La arena movediza crea un difícil problema cuando se trata de muestrear y llevar un registro. No hay manera de saber a qué parte del estrato corresponde el material que se ha depositado dentro del ademe, una vez que el desplazamiento ha tenido lugar. Además, el flujo ascendente de la arena tiende a separar las fracciones finas de las gruesas. La práctica usual es la de descartar el material que se ha desplazado hacia el ademe en un movimiento, y tratar de obtener una muestra a una profundidad aproximadamente igual a la del extremo inferior del ademe.

Durante cualquier etapa de perforación o de extracción con cuchara, los finos se desplazan hacia arriba y las partículas gruesas se sedimentan en el fondo de la masa de material. Se necesita mezclar más de una muestra de material extraído con la cuchara para obtener un volumen representativo del intervalo de muestreo. Lo anterior es muy importante cuando se está muestreando una formación de grava y arena.

Una cuchara con válvula de fondo plano se hace descender dentro de una masa de

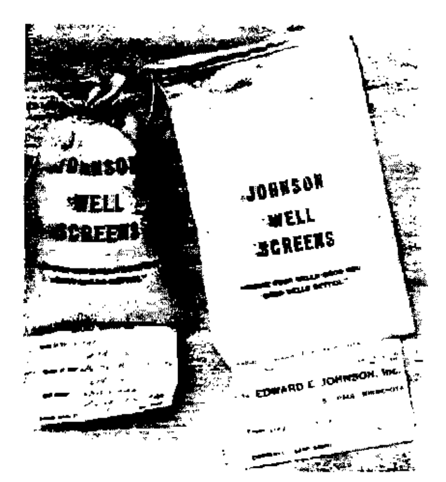


Fig. 121: Bolsas u otros recipientes adecuados para enviar las muestras al laboratorio.

material suelto, mediante una acción de bombeo que se logra haciendo bajar y subir la cuchara solamente unos pocos centímetros. El perforador hace a menudo esto, halando a mano el cable de cuchara. No resulta efectivo subir y bajar la cuchara más de unos pocos centímetros.

A veces resulta útil una bomba de arena con pistón de varilla, para muestrear, porque la carrera ascendente del pistón succiona material hacia la cuchara a través de la válvula. La acción anterior lava un poco la muestra, lo que debe tenerse en consideración.

La cuchara de válvula de dardo no es efectiva al muestrear formaciones de arena. Esta solamente puede atrapar el material cuando se ha mezclado suficiente lodo con el material granular, para mantenerlo en suspensión en un medio viscoso.

Aunque no se utiliza tanto como se debiera, el método conocido como muestreo mediante núcleos embutidos ("drive core"), proporciona la manera más precisa de obtener muestras representativas de los estratos en formaciones no consolidadas. El método consiste en hincar un tubo de 0.60 a 1.20 metros de longitud en el material que se pretende muestrear y luego izarlo sin que vibre. Para evitar que se pierda el núcleo de material contenido en el cilindro de muestreo, el tubo se hace penetrar por una distancia mayor que su longitud, para compactar el material que se encuentra adentro. Esta práctica permite recuperar el núcleo en la mayoría de los casos, aún cuando se esté muestreando arena, o grava y arena limpias.

El tubo se puede hincar dentro del tapón de material que haya penetrado dentro del ademe una vez que éste ha descendido una corta distancia, o también, puede hincarse dentro del material que se halla por debajo de la boca del ademe. Por lo general, el perforador debe decidir por tanteo cuál procedimiento escoge en un caso determinado.

Al hincar el cilindro muestreador, se utilizan tijeras de carrera larga. Estas se conectan directamente al extremo superior del tubo mediante un sustituto de acople adecuado. Luego se conectan al acople superior de las tijeras una barra de peso y un portaeable giratorio para proveer el peso necesario para la perforación. Usar las tijeras para golpear hacia abajo es contrario a la finalidad principal para la cual éstas se diseñan, pero los perforadores que utilizan este método de muestreo expresan que no se presentan rupturas fuera de lo corriente y que las buenas tijeras duran lo suficiente como para justificar su costo.

La recolección de muestras representativas, cuando se perfora con el método convencional de rotación, ofrece varias dificultades. Obtener buenas muestras depende considerablemente de la destreza y experiencia del perforador.

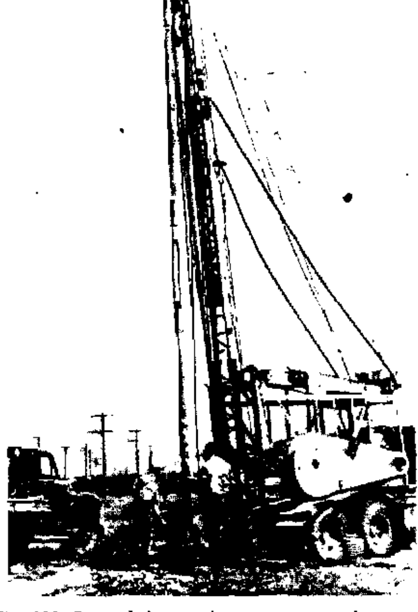


Fig. 122: Sarta de herramientas que se emplea con el sistema de percusión para obtener núcleos de muestra; la barra de peso se halla por encima de las tijeras de carrera larga, se usa por lo general una carrera de 30 centímetros.

(Cortesía de Jungmann Bros. Inc.)



Fig. 123: Retirando una muestra compacta de arena y grava, del cilindro muestreador. Unos cuantos golpes son suficientes.

(Cortesía de Jungmann Bros., Inc.)

Conforme las muestras de arena o de arena y grava se extraen desde el fondo del agujero, éstas son hasta cierto punto lavadas por el mismo fluído de perforación. Mediante un adecuado control del fluído de perforación, se puede disminuir, pero no eliminar por completo, la segregación de partículas de diferentes tamaños que tiene lugar. Los tamaños finos e intermedios de arena son obligados a ascender, por el fluído de perforación, más rápidamente que las partículas gruesas. Estas fracciones separadas deben volverse a combinar cuando el material se recoge en la superficie.

Cualquier método corriente de muestreo comprende dos pasos. Primero, el fluído se hace circular manteniéndolo por encima del barreno hasta que todas las cortaduras de la perforación sean eliminadas del agujero. Al mismo tiempo, se limpia el foso de muestreo. Enseguida se permite que el barreno penetre dentro de la formación por una distancia predeterminada, digamos 0.60, 0.90 ó 1.50 m. Todas las cortaduras de este intervalo de muestreo son entonces recogidas, mientras la circulación continúa y sin perforación adicional.

Debe proseguirse, entre tanto, haciendo girar la tubería de perforación, sin que ésta se asiente, mientras el fluído circula. Esto ayuda a mantener un flujo uniforme en el espacio anular alrededor de la tubería de perforación. El lodo hace subir más fácilmente, de este modo, las partículas del intervalo de muestreo.

Las cortaduras o fragmentos que se acumulan en el foso de muestreo, en la superficie, deberán trasladarse a un tubo u otro recipiente y permitir que sedimenten. El exceso de lodo de perforación deberá eliminarse con cuidado. Se anotará entonces la descripción de los fragmentos en el registro del pozo. Después de mezclar enérgicamente el material, se deberá tomar una pequeña muestra representativa de los fragmentos, colocarse en un recipiente adecuado y enviarla al laboratorio para su análisis.

Si mientras se perfora el intervalo predeterminado de muestreo, la acción del equipo de perforar denota que se ha entrado en un tipo diferente de material, debe detenerse la perforación y tomar una muestra tal como se ha descrito. Se tomarán las notas pertinentes en el registro y a partir de este punto se establecerá un nuevo intervalo, repitiendo todo el ciclo de operaciones.

Cuando se perfora un agujero de prueba de 15 centímetros, con tubo de perforación de 7.3 centímetros, la velocidad vertical del fluído para cada razón de circulación será aproximadamente como sigue:

Razón de Circulación (litros/minuto)	Velocidad Vertical del Lodo de Perforar metros/minuto
190	14
380	28
570	42
760	56

En los trabajos de muestreo se prefieren velocidades de 38 a 60 metros por minuto.

Para escoger el tipo de barreno de la perforación de investigación, se requiere tener experiencia local. Cuando se presentan estratos alternados de arcilla y de arena y grava, muchos perforadores prefieren un trépano escariador-recolector, o el de cola de pescado. El siguiente que se podría escoger es un trépano de tres alas, y a menos de que se trate de una formación de roca dura, el trépano para roca sería el más inadecuado.

La velocidad de rotación no debe ser muy alta en perforación de prueba. Los cambios que se presenten entre los materiales que van siendo penetrados, se identifican más fácilmente cuando el trépano gira a menor velocidad y manteniendo la circulación a la razón estipulada.

Un problema que algunas veces surge cuando se está perforando por el método rotatorio, es el de que el material de los estratos superiores, erosionado de la pared del agujero por la corriente ascendente de fluído de perforar, se mezcla con las

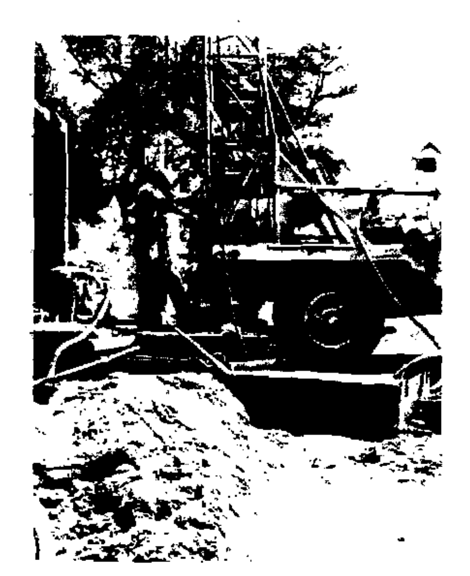


Fig. 124: Perforación de un agujero de prueba por el método hidráulico de rotación. El foso portátil de lodos, ahorra tiempo.



Fig. 125: Unidad portátil de registros eléctricos que se utiliza para investigaciones de agua subterránea mediante registros de resistividad y curvas de potencial espontáneo (PE) en la misma gráfica.

cortaduras del intervalo escogido de muestreo. Este problema se vuelve muy serio al aplicar este método de perforar, puesto que la circulación debe continuar durante un tiempo considerable después de perforar cada intervalo. El perforar intervalos sucesivos resulta impráctico también en agujeros de considerable profundidad, puesto que se consume mucho tiempo en aguardar por cada muestra.

Debido a estas situaciones, algunos perforadores prefieren tomar muestras, mientras perforan, más o menos continuamente en lugar de usar el método de intervalos definidos de muestreo.

Los materiales que se obtienen en la superficie mientras se perfora contínuamente, deberán combinarse de acuerdo con el criterio del perforador, lo que demanda obviamente mayor destreza y experiencia de parte de éste. El tiempo empleado por el fluído de perforación para transportar las cortaduras desde el fondo del agujero hasta la superficie del terreno, debe tenerse en cuenta al determinar la profundidad a que la muestra corresponde.

Cualquiera que sea el método que se utilice, cada muestra debe completarse e identificarse cuidadosamente. La profundi-

dad a que ésta se toma, el espesor del material a que corresponde y su secuencia dentro del registro del pozo, deben describirse claramente en la colilla de identificación.

Antes de enviar las muestras al laboratorio, el exceso de agua debe eliminarse. Si se usan bolsas postales de tela, las muestras deberán secarse a un calor moderado. Si se utilizan recipientes impermeables, las muestras no necesitan secarse. Nunca deberán lavarse las muestras. Si éstas contienen fluído o lodo de perforación, ello debe anotarse en la colilla de identificación. Si se presume que la formación contiene algo de arcilla natural, también debe anotarse.

En el Capítulo 9 se explican los métodos para analizar muestras de arena.

Métodos Geofísicos

Los métodos geofísicos suministran evidencia indirecta de las formaciones subsuperficiales, indicando si éstas pueden ser acuíferas. Los métodos geofísicos no miden directamente el tipo de roca, ni su porosidad, ni la permeabilidad o densidad de una formación. Lo que hacen es evaluar otras propiedades de los materiales, que varían con los factores determinantes de si una formación es suficientemente porosa y permeable como para servir de acuífero.

Los métodos geofísicos se clasifican en operaciones de superficie y en operaciones de sondeo. Los términos anteriores indican que las mediciones pueden hacerse cerca o en la superficie del terreno o debajo de éste, en agujeros de investigación.

Las mediciones de la resistividad eléctrica, muestran valores que varían con ciertas características del acuífero. Una arena limpia saturada de agua dulce muestra una resistividad relativamente alta. Una arena sucia, o sea, que contenga un poco de arcilla, indica una resistividad menor. Se sabe bien que una arena sucia tiene una permeabilidad menor que otra limpia. Luego, medir las resistividades eléctricas de ambos materiales constituye un método geofísico en el cual la mayor resistividad eléctrica de la arena limpia permite interpretar que este material es apto para ser un mejor acuífero, que el que muestra una resistividad menor. Estas mediciones eléctricas comparativas reflejan la presencia de la arcilla, pero en ningún momento miden directamente el valor de las propiedades hidráulicas de cualquiera de las dos formaciones.

Puesto que varios tipos de materiales terrestres exhiben por lo general valores característicos de resistividad, se pueden entonces identificar los estratos de distintos materiales; esto es, las arenas, gravas y areniscas altamente resistivas pueden diferenciarse de los materiales de baja resistividad tales como la arcilla y la lutita.

Estas diferencias tienen lugar cuando los respectivos materiales terrestres se encuentran en la zona de saturación de agua dulce.

Registro Eléctrico

La operación geofísica de sondeo más común, es el registro o perfil eléctrico. Este sirve para verificar y suplementar el registro descriptivo del agujero que el perforador lleva conforme avanza la perforación.

Un *perfil eléctrico* consiste de un registro de las resistividades aparentes de las formaciones subsuperficiales y de los potenciales espontáneos generados en el agujero, ambos trazados en función de la profundidad desde la superficie del terreno. Ambas propiedades se relacionan indirectamente con el carácter de las formaciones bajo la superficie y con la calidad del agua contenida en éstas. Estas mediciones solo pueden realizarse en agujeros no ademados y que contengan lodo.

Cuando se hallan secas, tanto la arena como la arcilla muestran resistividades muy altas. Al saturarlas con agua se reduce su

resistividad, pero en diferente grado en cada una. Esto sucede porque el agua es un conductor eléctrico y su presencia dentro de los poros interconectados de la formación provee un medio conductor que hace bajar la resistividad global de ésta. El grado hasta el cual la presencia del agua hace descender la resistividad depende primordialmente de la mineralización o del nivel de minerales disueltos del agua de la formación.

Lo anterior se deduce del hecho de que la conductividad eléctrica del agua varía con su contenido de minerales disueltos. El agua destilada es un conductor pobre y de alta resistividad; el agua salada es un buen conductor, de baja resistividad.

El agua de saturación en la arcilla siempre se encuentra altamente mineralizada debido a los minerales disueltos en las superficies químicamente activas de los millones y millones de partículas de arcilla que constituyen la formación. Como resultado de ello, las formaciones arcillosas exhiben una resistividad relativamente baja.

En contraposición con lo anterior, las formaciones arenosas saturadas de agua dulce, tienen resistividad relativamente alta puesto que el agua de saturación atrapa solamente pequeñas cantidades de minerales en las superficies de las partículas de arena.

Las formaciones arenosas saturadas de agua salada muestran resistividades tan bajas como las de las formaciones arcillosas. Esto hace casi imposible el poder distinguir una arena con agua salada de un lecho arcilloso, utilizando solamente la curva de resistividad del registro o perfil eléctrico.

Para correr el registro eléctrico se utilizan varios tipos de electrodos. La Fig. 126 muestra las tres configuraciones más ampliamente usadas. El electrodo de un solo punto es muy popular entre los contratistas de perforación de pozos, en tanto que los esquemas de electrodos múltiples se utilizan en la industria petrolera y en las compañías que se especializan en labores de geofísica.

Carácter de los Valores de la Resistividad

La resistividad que se mide cuando se emplea un electrodo de un solo punto, corresponde a la de un volumen limitado de material en las inmediaciones del electrodo, a una profundidad determinada. Este volumen, que puede concebirse como esférico, incluye un tramo corto de columna de lodo dentro del agujero, mas un pequeño volumen de los materiales de la formación que rodea al hoyo. Las resistividades del lodo y de los materiales de la formación, son diferentes de modo que el valor medido corresponde a un valor compuesto por ambos. Si el agujero es muy amplio y el electrodo se halla situado en su centro, solamente se medirá la resistividad del lodo que será la que se registre.

Hablando en términos generales, las curvas de resistividad se denominan normales cuando la medición se practica entre electrodos potenciales ampliamente separados. Las que se denominan curvas laterales se obtienen utilizando un instrumento con ambos electrodos potenciales razonablemente próximos a un electrodo de corriente.

El instrumental necesario para efectuar el registro eléctrico puede variar desde un equipo portátil de funcionamiento manual, hasta otro de transmisión mecánica montado en camión. El tipo de equipo que se utilice depende de la disponibilidad, de la profundidad del agujero y del diámetro del mismo. Para aquellos agujeros con profundidades que oscilan entre 300 y 1,000 metros, es preferible realizar el trabajo con un equipo impulsado por fuerza mecánica. Los pozos someros pueden registrarse fácilmente con un equipo de funcionamiento manual.

La interpretación es afectada por varias condiciones, todas las cuales deben tener cierto grado de consideración. Estas

incluyen: diámetro de la perforación, tipo de fluido dentro de éste, carácter químico del agua de la formación, porosidad de la misma, grado de invasión del lodo dentro de la formación y el tipo de diseño de electrodos que se utilice.

Una de las variables más importantes al efectuar un registro eléctrico, es la calidad química del agua de la formación. Como una primera aproximación, la resistividad de la formación varía inversamente con los sólidos disueltos contenidos en el agua. Una arena limpia saturada de agua que contenga 600 ppm de sólidos disueltos, indicará una resistividad de la formación, que es la mitad de la que tendría la misma arena si contuviese agua con 300 ppm de sólidos disueltos.

Curva de Potencial Espontáneo

Una parte integral del registro eléctrico completo, es la curva de potencial espontáneo, que muestra el cambio de potencial espontáneo o auto potencial que tiene lugar con la profundidad. De acuerdo con la Schlumberger Well Surveying Corporation, estas designaciones corresponden a diferencias naturales de potencial que tienen lugar entre un electrodo colocado en la superficie y otro situado dentro de una columna de lodo conductor y a cualquier profundidad particular. Estos potenciales descendentes del agujero, son el resultado de ciertas corrientes de origen electroquímico. Tales corrientes se originan en los contactos entre el lodo de perforación y el agua contenida en el estrato permeable y

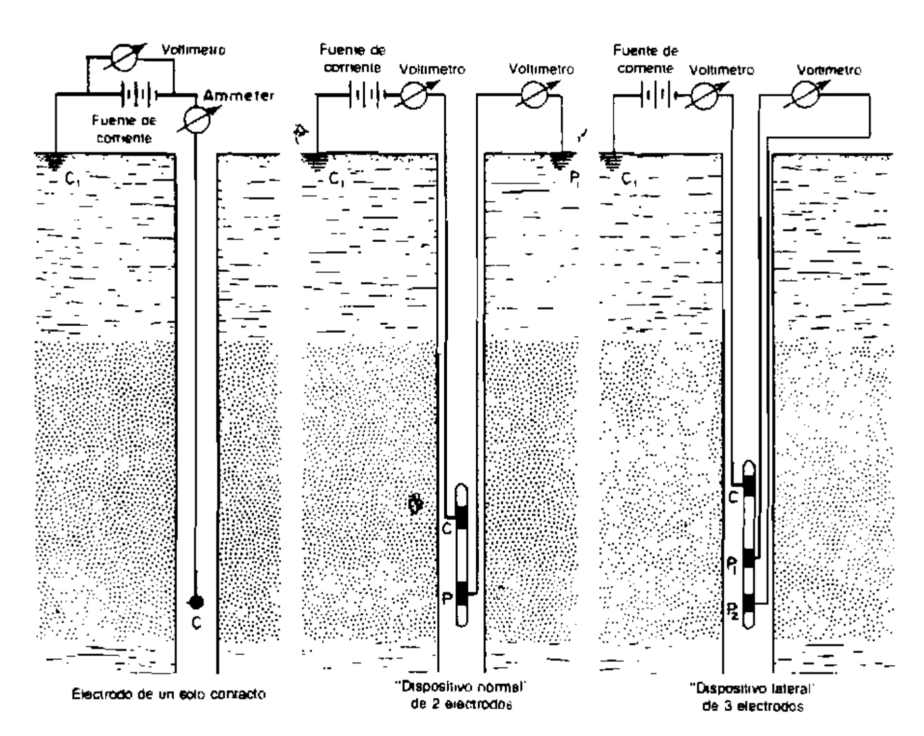


Fig. 126: Diagrama esquemático de la distribución de electrodos y de circuitos eléctricos, correspondiente a tres procedimientos, cada uno de los cuales, produce una curva de resistividad que difiere en ciertos detalles de las otras. Estas diferencias son de utilidad al interpretar los registros.

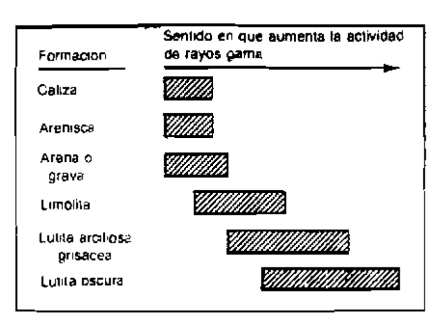


Fig. 127: Actividad relativa de rayos gama de diversos tipos de materiales geologicos.

a través de las capas de arcilla que se hallan por encima y por debajo de éste.

La curva de auto potencial, en el caso de pozos someros que solamente penetran horizontes de agua dulce, es poco significativa y suministra escasa información de utilidad.

Registros Mediante Rayos Gamma

El registro mediante rayos gama es un procedimiento geofísico de sondeo basado en la medición de la radiación natural de rayos gama, proveniente de los elementos radiactivos que tienen lugar en cantidades variables, en las formaciones sub-superficiales. El registro es un diagrama que muestra la emisión relativa de rayos gama, medida en impulsos por segundo, y en función de la profundidad por debajo de la superficie. La curva que así se obtiene es similar en apariencia a la curva de resistividad de un registro eléctrico corriente.

Los cambios de radiación están por lo general asociados a diferencias existentes entre los tipos de materiales que componen los sucesivos estratos. Algunas formaciones contienen una mayor concentración de elementos radiactivos, tales como el uranio, torio y el isótopo radiactivo del potasio además de otros. En la mayoría de los casos, la arcilla y la lutita contienen mayor cantidad de estos elementos que la caliza, la arenisca y la arena. El registro, pues, en formaciones no consolidadas, indica principalmente lechos de arcilla en aquellas profundidades en donde la intensidad de los rayos gama es alta y estratos de arena cuando la intensidad es baja. En muchos casos el registro de rayos gama es un indicador más definitivo de la arcilla y de la lutita, que el registro eléctrico. La actividad relativa de rayos gama de diversos materiales se muestra en la Fig. 127.

El instrumental para registros de rayos gama es más o menos el mismo que se usa para los registros eléctricos, exceptuando la sonda para el agujero y el mecanismo detector. Se pueden correr registros utilizando un conductor Geiger-Mueller o un contador de centelleos conjuntamente con la unidad sensora que se introduce en el agujero. El contador de centelleos es preferible porque es altamente sensible y la sonda resulta de un diámetro menor.

El circuito de conteo en la superficie convierte el número de pulsaciones eléctricas por segundo que envía la sonda, a voltajes o potenciales que son registrados en forma contínua en una cinta o película, conforme la sonda se va haciendo descender dentro del agujero.

Los registros de rayos gama se pueden obtener ya sea que el agujero se encuentre o no, ademado con tubería de acero. El metal del tubo absorbe una parte de la radiación, pero este tipo de registro puede usarse en ciertos casos en que la presencia del ademe desvirtúa el uso del registro eléctrico.

Los cambios en la calidad del agua tienen poco efecto sobre el registro de rayos gama, de modo que éste resulta de gran valor al identificar la posición y el espesor de las formaciones arcillosas que alternan con lentes arenosos conteniendo agua salobre o salada. Caben excepciones cuando la arena incluye partículas rocosas de material que en general es radiactivo. Cuando esto sucede, la arena podría mostrar una emisión de rayos gama similar a la de la arcilla. Se necesita

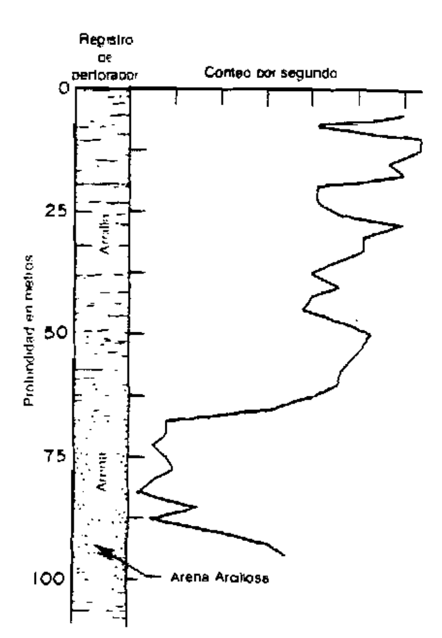


Fig. 128: Registro de rayos gama y perfil litológico del perforador, en un pozo perforado en Indiana por el método de percusión.
(Cortesía de W. F. Keck y Asociados)

efectuar una comparación con el registro litológico que lleva el perforador, para una interpretación correcta en tales casos.

Los siguientes párrafos, transcritos de una publicación ténica[3] de Hubert Guyod, consultor de la División de Instrumentos para Pozos de Industrias Mandrel, Inc., describe los usos y las limitaciones de los registros eléctricos y de rayos gama

"Los instrumentos para correr registros de resistividad miden la resistividad media ponderada, denominada resistividad aparente, de un cierto volumen de material en la vecindad de la sonda registradora. Cuanto más grande el contraste entre las resistividades del acuífero y del lodo y las resistividades de los lechos adyacentes, mayor será la desviación entre los valores aparente y verdadero. La desviación será pequeña si los acuíferos son gruesos y tienen altas porosidades; por lo tanto, no tiene mayores consecuencias si el registro se usa en forma cualitativa, como es lo más corriente en los pozos de agua. La desviación es grande en las formaciones altamente resistivas y un acuífero de baja porosidad puede ser confundido con una roca densa, si el análisis se basa únicamente en la curva de resistividad.

"*Ejemplos de curvas de resistividad.* Las Figs. 129, 130 y 131, corresponden a registros artificiales eléctricos y de rayos gama de tres tipos de formaciones. Su apariencia es aproximadamente de la de los registros reales de las formaciones mostradas, a condición de que el diámetro del agujero sea menor de 25 centímetros y que la resistividad del fluído dentro del agujero sea mayor de un ohmio-metro. . . . Los intervalos marcados como arena o arenisca podrían representar rocas granulares carbonáticas, puesto que éstas tienen aproximadamente las mismas resistividades, cuando los otros factores permanecen constantes. Los estratos mostrados son de textura uniforme y de 3 a 7.5 metros de espesor. Los registros reales tienen una forma más irregular puesto que las curvas reflejan la falta de uniformidad de las rocas verdaderas.

"Las curvas artificiales de resistividad ponen de relieve lo siguiente:

1. Los acuíferos de agua dulce y las rocas densas poseen una resistividad más alta que la mayor parte de las otras formaciones.

2. Las resistividades aparentes de los acuíferos de agua dulce que tienen baja porosidad son del mismo orden que las de las rocas densas. Estas pueden diferenciarse observando la velocidad de penetración del barreno, el carácter de las cortaduras y en algunas ocasiones, la curva de potencial espontáneo.

3. Los acuíferos que contienen agua altamente salina tienen resistividades parecidas a las de la arcilla. En la práctica, estos acuíferos pueden diferenciarse de la arcilla mediante el uso de las curvas de potencial espontáneo o de rayos gama.

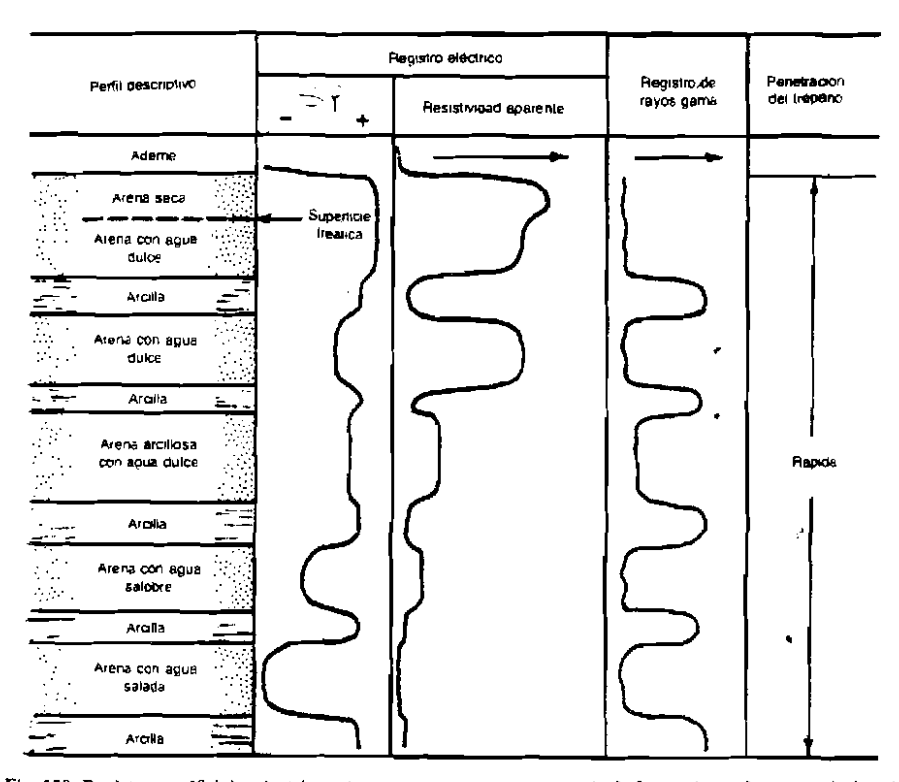


Fig. 129: Registros artificiales eléctrico y de rayos gama en una secuencia de formaciones de arena y lechos de arcilla. El agua mineralizada de las arenas inferiores reduce su resistividad aparente con relación a la de la arcilla, pero el registro de rayos gama permite distinguir los lechos de arcilla de los estratos arenosos.

4. La curva de resistividad permite, en la mayoría de los casos, establecer con precisión la profundidad y los espesores de los estratos, pero no así el tamaño de las fracturas individuales de las rocas consolidadas.

"*Principio en que se basa el uso de los datos de resistividad.*" Para un perforador de pozos, las ventajas más tangibles que se pueden derivar de un registro son las que se obtienen de la inspección de las curvas. La curva de resistividad, aún la registrada con el instrumento más económico, es la que más revela. Al observarla, el perforador puede determinar la profundidad y el espesor de cualquier estrato, excepto los muy delgados. Esto le permite organizar un programa para lograr la óptima colocación de la rejilla. Si tuviese que aventurarse dentro de una zona de agua salobre, observará de inmediato la correspondiente disminución de la resistividad, hecho que aunque no infalible, le permite tomar las precauciones del caso. Si la velocidad de penetración del barreno es esencialmente la misma en todos los acuíferos registrados, se puede suponer que sus porosidades son del mismo orden y en consecuencia se puede interpretar una disminución de la resistividad aparente, como indicación de un incremento de la salinidad.

"Cuando se sabe que la calidad del agua permanece casi constante en todos los acuíferos que se hayan penetrado, los cambios de resistividad se pueden interpretar como la consecuencia de las variaciones en

porosidad o debido a una condición arcillosa. El empleo simultáneo de las curvas de potencial espontáneo o de rayos gama, permitirá, por lo general, determinar cuál de las dos situaciones prevalece.

"En la práctica, la interpretación del registro no se hace únicamente con la curva de resistividad: el potencial espontáneo y cualesquiera otros datos disponibles, se analizan conjuntamente con aquélla.

"La curva de potencial espontáneo resulta la más útil en el caso de formaciones que comprendan arcilla y acuíferos granulares, especialmente por debajo de unos cuantos centenares de metros. Para propósitos interpretativos, la curva de potencial espontáneo se analiza siempre simultáneamente con la de resistividad y con otros datos disponibles.

"Cuando las aguas de las formaciones son mucho más salinas que el lodo de perforación, la curva de potencial espontáneo es por lo general de magnitud más negativa en los acuíferos que en los estratos de arcilla. Lo anterior permite el uso de la curva para identificar la formación, propósitos de correlación y para determinar la profundidad y el espesor de ciertos lechos.

El potencial espontáneo no tiene por lo general ningún significado cuando no existen formaciones arcillosas en la secuencia de horizontes penetrados por el agujero.

"Una curva de potecial espontáneo registrada dentro de un ademe de acero, se refiere más que a otra cosa a la corrosión que pudiese haber tenido lugar a la fecha del registro. Cuando el ademe es de material plástico, la curva es prácticamente una línea recta vertical.

"*Interpretación de las curvas de rayos gama*. Los tres registros geofísicos muestran curvas artificiales de rayos gama. En estos ejemplos, se supone que solamente la arcilla es radiactiva.

"En una localidad dada, solamente la intensidad relativa, medida en las diversas formaciones, resulta significativa. Las formaciones que exhiben una intensidad baja de rayos gama, son las arenas limpias, las gravas, las areniscas, las calizas, la dolomita y la anhidrita, la sal, el lignito o el carbón. Una lectura baja de rayos gama puede indicar un acuífero poroso y permeable lo mismo que una roca impermeable. Se necesita información geológica complementaria para resolver esta ambigüedad.

"Si se sabe que los materiales subsuperficiales tienen solamente radiactividad baja, entonces todos los intervalos del registro que muestran una alta intensidad de rayos gama, corresponden a arcilla. Los intervalos de mediana intensidad corresponden a rocas, generalmente acuíferas, que contienen algún material arcilloso; se puede suponer que el contenido de arcilla aumenta casi en proporción directa con la intensidad de la emisión de rayos gama.

"Si no se conoce nada acerca de la radiactividad de los materiales del subsuelo, no es posible interpretar aquellos intervalos del registro que indican una intensidad de rayos gama alta o intermedia. La duda puede disiparse si se dispone de un registro eléctrico o de experiencia local.

"La curva de rayos gama debe siempre correlacionarse con el registro del perforador y con otros datos de que se disponga.

"Cuando para perforar se usa agua en lugar de un fluído apropiado, la arcilla y otras cortaduras se pueden sedimentar y aumentar la intensidad de los rayos gama a unos 1.50 ó 3 metros del fondo del agujero.

"Puede haber quedado lodo viscoso de perforación detrás del ademe o existir un poco de material arcilloso en la superficie de ciertas rocas no radiactivas. Estas condiciones aumentan la intensidad de los rayos gama, lo que hace que las formaciones aparezcan en el registro como si fuesen una arcilla arenosa o arenas arcillosas

"En los pozos dotados de filtro de grava, ésta detiene una cantidad apreciable de rayos

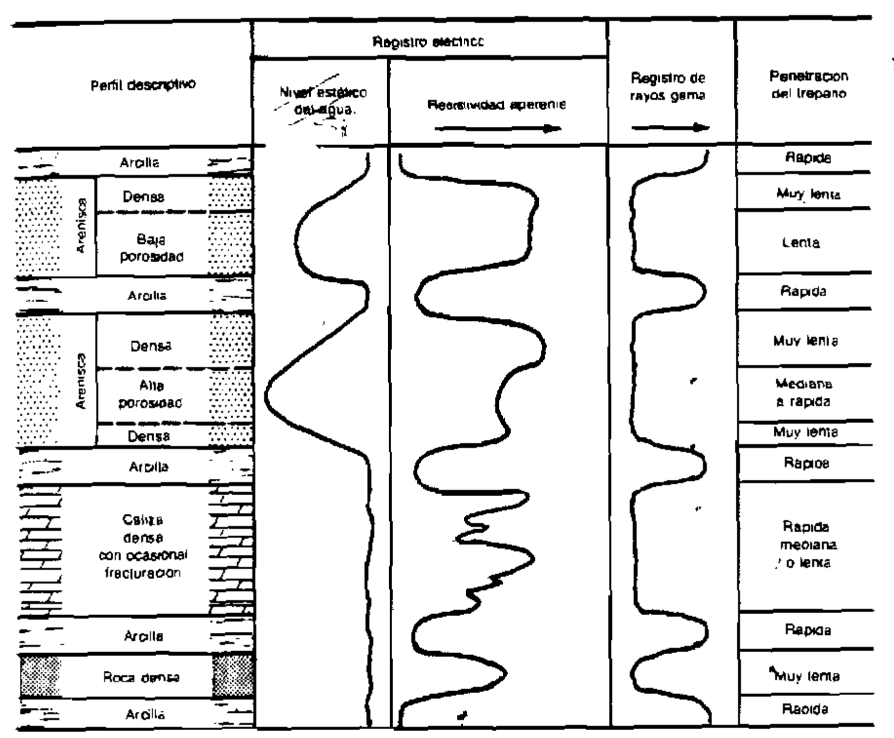


Fig. 130: Registros geofísicos artificiales de estratos de roca consolidada separados por lechos de arcilla.

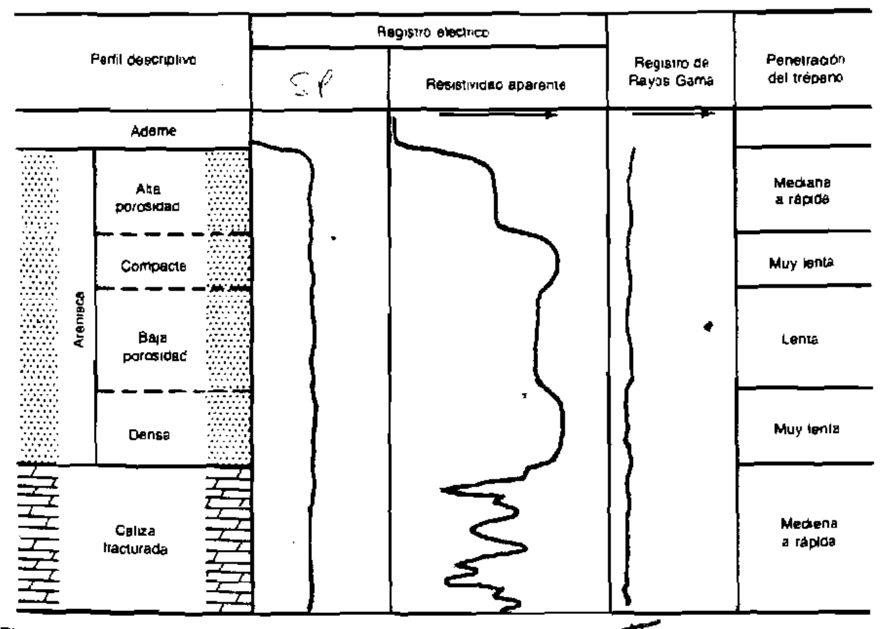


Fig. 131: Registros artificiales eléctrico y de rayos gama, en estratos de roca consolidada. Los estatos porosos corresponden a acuíferos de agua dulce. En la ausencia de lechos de arcilla, el registro de rayos gama no muestra nada.

gama que de otra manera llegarían al detector, reduciendo así la amplitud de los rayos. Si el material utilizado para el filtro de grava es radiactivo, tal como la grava que proviene de rocas volcánicas o graníticas, el registro de rayos gama se altera considerablemente por la presencia y espesor de este material."

Una buena aplicación del registro de rayos gama, es el caso de aquellos pozos ademados en que el registro descriptivo no es suficiente o digno de confianza. Los pozos que no producen suficiente agua o cuyo contenido mineral es inconveniente, se pueden por lo general mejorar cuando el registro de rayos gama indica la presencia de otros buenos acuíferos.

Los registros eléctricos y de rayos gama resuelven o ayudan a resolver algunos de los problemas más importantes que se presentan en la investigación de aguas subterráneas, especialmente cuando también se utilizan otros datos de los que por lo general se dispone. Ello es esencial para una satisfactoria aplicación e interpretación de las mediciones. Sin embargo, ningún método o conjunto de métodos puede resolver un problema determinado en todos los casos.

En su publicación, Guyod[3] describe algunas de las limitaciones de los registros geofísicos, tales como las siguientes:

"La presencia de los acuíferos puede inferirse de los datos brindados por el registro eléctrico, suplementado algunas veces por la curva de rayos gama. En aquellos pozos ademados, el registro de rayos gama indica principalmente los intervalos que contienen arcilla. Cuál de los otros intervalos contiene agua, es un asunto que debe establecerse mediante los otros datos.

"La curva de resistividad, suplementada por la curva de potencial espontáneo, indica

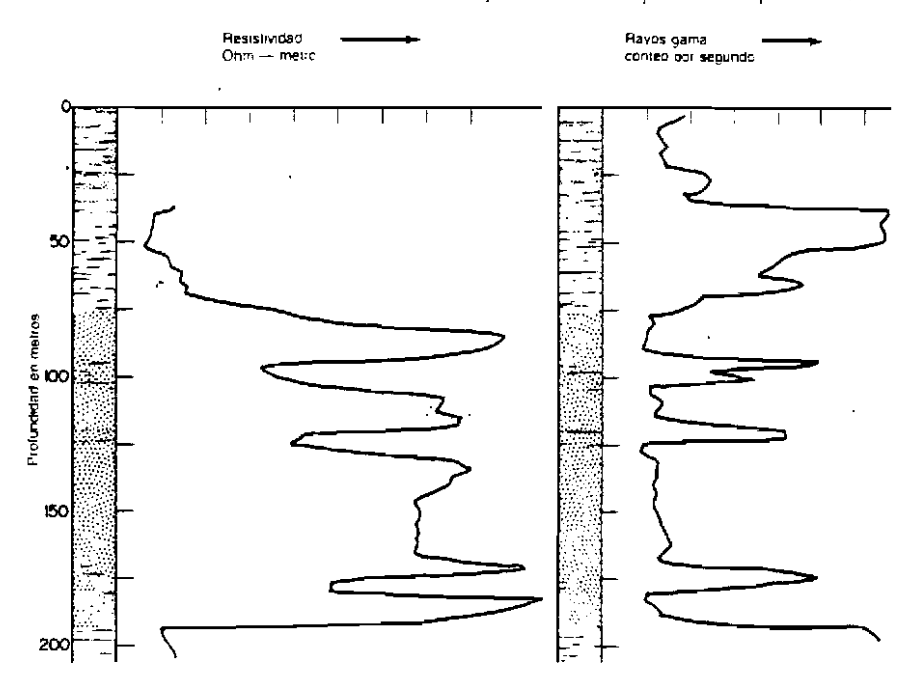


Fig. 132: Comparación de una curva de resistividad con otra de rayos gama, obtenidas al registrar un pozo no ademado perforado en una formación de arenisca.

que la salinidad del agua aumenta considerablemente. De los registros geofísicos no se puede derivar información relativa al pH, agua sulfurosa, algún ión específico, presencia de bacterias ni potabilidad.

"La cantidad de agua de un acuífero es proporcional al espesor neto y a su porosidad. El espesor de un acuífero granular puede determinarse con gran exactitud mediante el registro eléctrico. Este también revela el espesor aproximado de los delgados lentes impermeables intercalados en el acuífero. El espesor de un acuífero granular y el de los lentes arcillosos, pueden determinarse también utilizando la curva de rayos gama, en aquellos casos en que no existe roca densa presente: sin embargo, la exactitud no es tan buena como la que se obtiene con el registro eléctrico.

"De los registros geofísicos no se puede conocer directamente el rendimiento de un acuífero. No es posible distinguir una arena limpia y fina de una grava limpia y gruesa con sólo el registro eléctrico. Los estratos delgados impermeables que reducen la permeabilidad vertical de un acuífero, pueden definirse mediante registros eléctricos, y si hay arcilla presente, también con los registros de rayos gama.

"No existe un registro geofísico que revele la composición mineralógica de una formación. En áreas conocidas, la naturaleza de la mayoría de los horizontes puede inferirse del registro elétrico y, algunas veces, del registro de rayos gama.

"El registro eléctrico identifica la profundidad y el espesor de cada acuífero granular de agua dulce. En consecuencia, permite la colocación de las rejillas exactamente enfrente de estos acuíferos, con tramos de ademe ciego enfrentados a las formaciones que no se desea captar.

"Prácticamente todos los registros geofísicos pueden utilizarse en correlaciones para propósitos de mapeo subsuperficial, pero el potencial espontáneo obtenido a profundidades someras, no es digno de confianza, debido a las inversiones de polaridad impredecibles que pueden ocurrir."

Investigación mediante Resistividad Eléctrica

El reconocimiento mediante resistividad eléctrica constituye una operación geofísica exploratoria, en la cual las mediciones de la resistividad de la tierra se realizan en la superficie del terreno.

Los valores relativos de la resistividad eléctrica, pueden interpretarse, bajo ciertas condiciones, en función de la geología general del subsuelo hasta profundidades limitadas. El método se emplea en las exploraciones de agua subterránea, casi desde 1930.

Diversos tipos de materiales terrestres muestran por lo general cierto rango de valores de la resistividad eléctrica. Los factores que influyen en estos valores se describieron con cierto detalle en la discusión anterior relativa a los registros eléctricos.

Las mediciones de la resistividad se efectúan utilizando cuatro electrodos colocados en el terreno. Luego se aplica una corriente a éste, mediante dos de los electrodos y se observa la caída de potencial que tiene lugar en los otros dos. El esquema más generalizado es el de Wenner, con electrodos igualmente espaciados a lo largo de una línea recta, tal como se indica en la Fig. 134.

La resistividad aparente se calcula mediante la caída de potencial, la corriente que se aplicó y la separación de los electrodos. Por lo general, el instrumento se diseña de modo que la relación entre la caída de potencial y la corriente aplicada, se lea directamente en ohmios, como una resistencia.

El valor que así se obtiene se asimila a la resistividad aparente de todo el material terrestre por encima de cierta profundidad

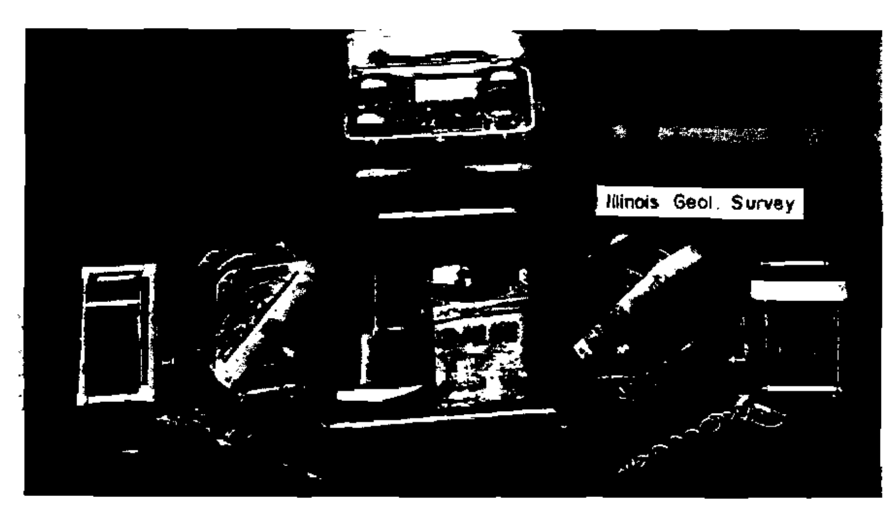


Fig. 133: Instrumental de resistividad terrestre empleado por el Servicio Geológico de Illinois en sus investigaciones de aguas subterráneas.

que es proporcional a la separación entre los electrodos. La resistividad aparente obtenida, se considera como un promedio ponderado de las resistividades reales de los estratos individuales contenidos hasta la profundidad de penetración de las mediciones de resistencia.

En los materiales uniformes no estratificados el factor de penetración es igual a la separación entre los electrodos. Cuando varios estratos cercanos a la superficie tienen valores muy diferentes de resistividad, el factor de penetración puede ser de sólo una cuarta parte de la separación entre electrodos. La relación entre la profundidad de penetración y la separación

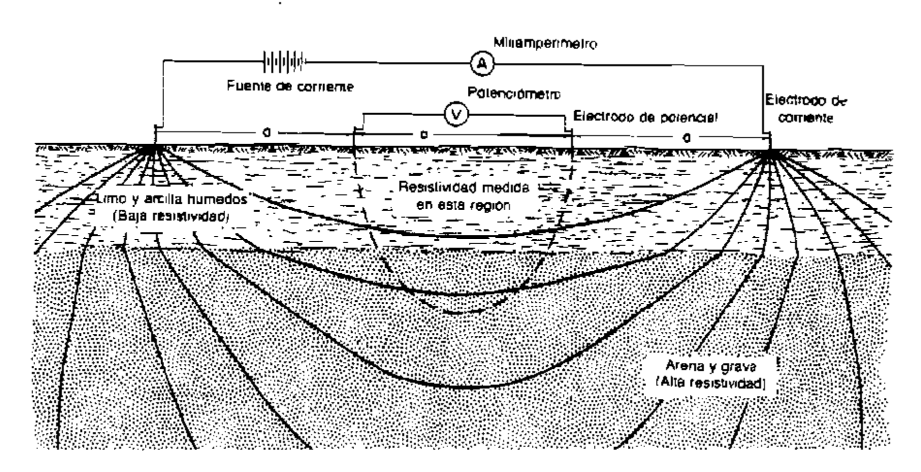


Fig. 134: La resistividad aparente del terreno se determina midiendo la caída de voltaje entre dos electrodos interiores cuando se hace circular una corriente por el terreno entre los dos electrodos exteriores. La profundidad de sondeo varía con la separación entre electrodos. La disposición mostrada se conoce como configuración de Wenner.

entre electrodos, es en consecuencia una variable que depende de las condiciones geológicas locales.

Cuando se utiliza el método de resistividad en la investigación de una área determinada, se necesita obtener información adicional de verificación geológica, mediante perforaciones investigativas. Las profundidades y espesores revelados por los registros de los agujeros de investigación, ayudan a establecer ciertas reglas empíricas que permiten relacionar las resistividades aparentes con aquellas condiciones subsuperficiales conocidas en los puntos de perforación.

Los estudios por medio de resistividad eléctrica, pueden realizarse de dos maneras, a saber: por el procedimiento del perfil de profundidad y por el de poligonal escalonada.

Los datos para el perfil de profundidad se obtienen mediante una sola estación o sitio, tomando una serie de lecturas de resistencia a diferentes separaciones de electrodos. La resistividad aparente se lleva luego a un gráfico en función de la separación entre los electrodos, y la curva que resulta se interpreta según las indicaciones geológicas. Cuando los datos son buenos, el perfil corresponde al de una curva suave.

La Fig. 135 muestra la comparación entre un perfil de profundidad obtenido mediante mediciones de resistividad en la superficie y el registro eléctrico de un agujero de investigación perforado en el mismo sitio. En este caso, la correlación es buena: los datos obtenidos por medio de las mediciones de superficie reflejan con confianza las condiciones del subsuelo. Puede observarse el contraste entre la suavidad de la curva del perfil de profundidad y la irregularidad del registro eléctrico.

El procedimiento de la poligonal escalonada requiere tomar lecturas en una serie de estaciones distribuidas a lo largo de varias líneas paralelas, manteniendo en cada una de ellas, la misma separación entre electrodos. Luego se pueden trazar perfiles de resistividad, mediante los datos obtenidos a lo largo de cualquier línea que se desee, tal como se haría al tratar de desarrollar una sección transversal de un valle fluvial. Sin embargo, las determinaciones basadas solamente en resultados de resistividad de superficie, son a menudo desalentadoras.

Los reconocimientos por resistividad eléctrica encuentran su mejor aplicación en las exploraciones preliminares de áreas extensas, del orden de más de 8 hectáreas, en las que se busca un sustancial desarrollado de las aguas subterráneas. Las estaciones se emplazan en una red que cubra el área. Se puede utilizar una combinación del perfil de profundidad y de la poligonal escalonada.

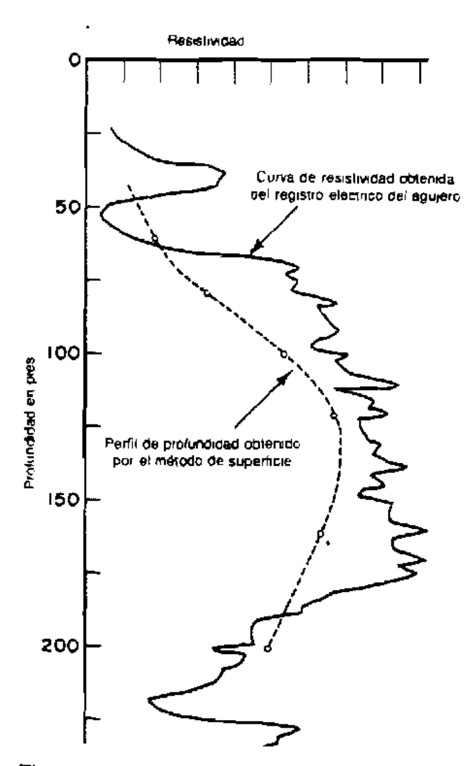


Fig. 135: Perfil de profundidad versus resistividad, obtenido mediante mediciones de superficie, comparado con el registro eléctrico realizado en un agujero de prueba, perforado en el mismo sitio.

Empleando la verificación geológica mediante agujeros de investigación, se selecciona el intervalo o intervalos que parecen más favorables y se miden sus valores de resistividad aparente. Estas resistividades se llevan luego a un mapa y se trazan las correspondientes curvas de isovalor. El resultado que se obtiene mediante este procedimiento se utiliza luego como una guía para escoger sitios adicionales de perforacion en aquellos lugares en que una alta resistividad indique la posible presencia de acuiferos de arena. El objetivo que se persigue es el de permitir la exploración de una área extensa con menor número de perforaciones de las que se necesitarían si se siguiera un programa de perforaciones al azar.

Ciertas condiciones de campo que podrían reducir el éxito de la exploracion mediante resistividad eléctrica, son por ejemplo, la presencia de conductos enterrados como tubería y cables, además de vallas con postes metálicos, líneas aéreas de transmisión eléctrica de alto voltaje y el agua que percola a través del suelo después de una lluvia. Si el terreno se halla congelado hasta una profundidad a la cual no hayan penetrado los electrodos completamente, los datos que se obtengan podrían ser erráticos.

Reconocimiento por Refracción Sísmica

El principio de la refracción sísmica se basa en la premisa de que las ondas de choque viajan a través de los diferentes materiales de la tierra tales como arena, arcilla y roca dura, a diferentes velocidades. Cuanto mas denso el material, más rápidamente viajarán las ondas.

Mediante mediciones en sitio, de las diferencias de velocidad, se puede verificar la existencia de diferentes capas de materiales subsuperficiales. En ciertas condiciones se pueden determinar los espesores de las dos o tres capas más próximas a la superficie. El método sólo se puede utilizar cuando la velocidad de la onda de choque aumenta conforme la profundidad crece.

Las ondas sísmicas o de choque son producidas mediante la colocación de una carga explosiva en un hoyo poco profundo o golpeando el terreno con un pesado mazo. Se emplea un sismógrafo para registrar el tiempo de llegada de la onda de choque a través de una distancia medida desde el punto de la explosión o golpe. Luego se calcula la velocidad de la primera parte de la onda de choque. Al comparar las velocidades medidas a varias distancias entre el punto de explosión y el detector, se

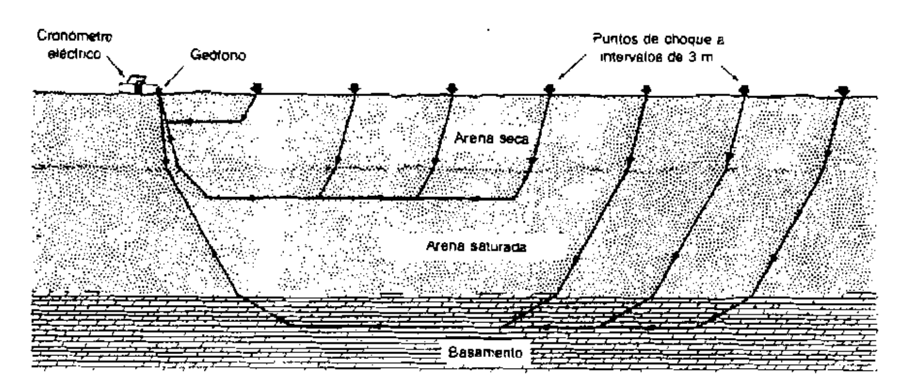


Fig. 136: El impulso proveniente de cada punto de explosion viaja a través de la trayectoria más rápida hasta el detector, tal como se muestra en la secuencia de estratos de este diagrama. Las ondas de choque que vienen de puntos distantes viajan mas rapidamente por las trayectorias refractadas en el basamento rocoso que por vias más directas dentro de los estratos sobreyacientes.

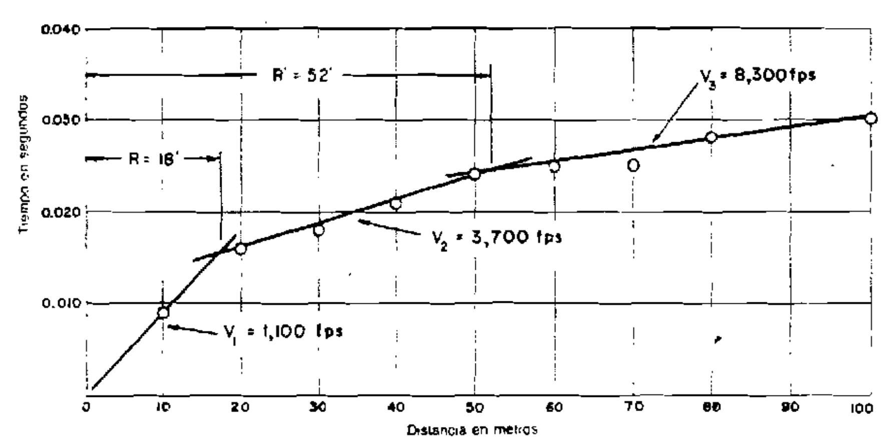


Fig. 137: Este gráfico de velocidad sísmica muestra el tiempo de llegada del primer impulso para cada distancia. La pendiente de cada segmento de la curva indica la velocidad de los estratos respectivos, tal como se muestra en la Fig. 136.

obtiene una base para estimar las condiciones geológicas del subsuelo.

Los instrumentos portátiles sismográficos utilizan golpes sobre la superficie del terreno, para producir las ondas de choque. El ensayo se efectúa colocando el detector en contacto con el terreno, conectando un cable eléctrico con el contador de tiempo y dando golpes con un mazo a varias distancias del detector. Se comienza en un punto a 3 m. del detector y se prosigue con los puntos siguientes de impacto, a intervalos de 3 m.

Las ondas provenientes de cada punto de impacto viajan a través de los materiales terrestres siguiendo diversas trayectorias. En los puntos cercanos al detector, los impulsos viajan más rápidamente a través de la capa superior del suelo. A mayores distancias del receptor, sin embargo, un cierto impulso puede penetrar la capa superior hasta una profundidad a la que se encuentre un estrato más denso, siguiendo a través de éste y retornando a la superficie en menor tiempo del que le tomaría al mismo impacto ser transmitido horizontalmente a traves del estrato superior. Este hecho constituye la base del procedimiento de refracción sísmica.

La Fig. 136 muestra las trayectorias probables para el tiempo mínimo de recorrido, en la condición geológica supuesta. El impulso que llega primero desde el punto de impacto más cercano, es el que pasa a través de la capa superior. La ruta más rápida para los impulsos provenientes de los puntos de impacto dos, tres y cuatro, es hacia abajo por el estrato superior, enseguida por el lado superior de la arena acuífera y luego hacia la superficie. Análogamente, los impulsos de los puntos de impacto cinco, seis y siete, viajan al máximo de rapidez, penetrando en el basamento rocoso y regresando hacia arriba a través de los estratos sobreyacientes.

Para analizar los resultados de un ensayo sísmico, se llevan a un diagrama los tiempos de llegada de la primera onda de choque de cada uno de los puntos mencionados y sus respectivas distancias. Los puntos así ubicados en la gráfica, se conectan con líneas rectas, obteniéndose un diagrama como el mostrado por la Fig. 137.

Las pendientes de estas líneas rectas indican la máxima velocidad correspondiente a cada distancia entre el punto de impacto y el detector. El cambio de velocidad y la distancia horizontal a que éste tiene lugar, suministra los datos necesarios

para calcular la profundidad a que se halla cada contraste de condiciones geológicas, por debajo de la superficie.

Mediante la siguiente expresión matemática, se calcula el espesor de la capa superior, o la profundidad al primer cambio de formación geológica:

$$D = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

En la expresión anterior:

D = profundidad en metros
V_1 = velocidad de la onda de choque en el estrato, m/s
V_2 = velocidad de la onda de choque en la segunda capa, m/s
R = distancia, en metros, al cambio de velocidad indicado por la gráfica.

Cuando existen tres capas, la expansión de esta misma ecuación permite calcular el espesor de la segunda capa y la profundidad del basamento.

El uso más frecuente del método sísmico es el de la determinación de la profundidad del basamento. Se pueden así reconocer canales enterrados en la roca. En las áreas de glaciación, estos canales enterrados contienen a menudo depósitos de arena y grava que constituyen excelentes acuíferos.

Referencias

1. "A Primer on Ground Water", (1963) U. S. Geological Survey, Washington, D.C.
2. GORDON, R. W., "Water Well Drilling with Cable Tools," pp. 80-86, 134-139 (1958), Bucyrus-Erie Co., South Milwaukee, Wis.
3. GUYOD, Hubert "Interpretation of Electric and Gamma Ray Logs in Water Wells." AGU Technical Paper (1965), Madrel Industries, Inc., Houston, Texas.
4. JONES, P. H. and BUFORD, T. D. "Electrical Logging Applied to Ground-Water Exploration." Geophysics, Vol. 16 No. 1 (1951).
5. BUHLE, M. B. and BRUECKAMN, John E., "Electrical Earth Resistivity Surveying in Illinois," Circular 376 (1964), Illinois State Geological Survey, Champaign
6. WOOLLARD, G. P. and HANSON, G. F., "Geophysical Methods Applied to Geologic Problems in Wisconsin." Bulletin 78 (1954), Wisconsin Geological Survey, Madison
7. LINEHAN, D. and KEITH, Scott, "Seismic Reconnaissance for Ground Water Development." Journal, New England Water Works Association, Vol. 63, No. 1, (1948)
8. LINCK, C. J., "Geophysics Aids Small Drilling Contractor." Ground Water (1963), Urbana, Illinois

Capitulo 9

Análisis de Muestras de Arena

CIERTOS ESTUDIOS cuidadosos han establecido el hecho de que la distribución del tamaño de los granos que constituyen los depósitos aluviales y glaciales de los materiales acuíferos, no es un suceso que haya tenido lugar al azar. Pareciera haber quedado claro que las gradaciones de estos materiales han sido determinadas por algunas de las características de los diversos procesos geológicos que han intervenido en su deposición.

Los análisis granulométricos de las muestras obtenidas durante la perforación de agujeros de investigación o de pozos de producción, revelan las características de la arena acuífera. El resultado que se obtiene permite tomar en cuenta los factores que inciden en el diseño de un pozo dotado de rejilla. El Capítulo 10 discute todos estos puntos en detalle. Uno de los factores críticos consiste en escoger la abertura de ranura correcta de la rejilla.

El análisis granulométrico completo de una muestra de arena se lleva a un gráfico para obtener así una curva que muestre la distribución de los diversos tamaños de granos, desde finos a gruesos y que constituyen la muestra. Para poder comparar la gradación de una muestra con la de otra, se hace necesario ajustarse a un procedimiento uniforme para el ensayo de las muestras de arena.

El instrumental que se necesita para analizar muestras de arena, incluye una hornilla para su secado, un juego de mallas estándar y una balanza de precisión para pesar los materiales. Por lo general se emplean las cribas de malla de alambre, de 20 centímetros de diámetro. Los mejores tipos de balanza dan el peso en gramos y son sensibles hasta aproximadamente un gramo. Las balanzas que dan el peso en onzas también se utilizan, pero por lo general son menos precisas.

Al preparar una muestra determinada para su análisis, debe mezclarse ésta vigorosamente antes de dividirla. Si el material se encuentra húmedo al extremo de que sus partículas permanecen juntas y no se separan, utilícese una cuchara para tomar una cantidad apropiada. Alrededor de una taza de material es suficiente para efectuar el análisis. Si el material consiste de arena fina, será suficiente usar alrededor de media taza para que las cribas no se sobrecarguen.

Si la muestra se halla seca, las partículas

finas y gruesas no permanecerán unidas sino que por el contrario, tenderán a separarse o segregarse. La muestra seca deberá entonces dividirse por el método de cuarteo, de modo que la muestra reducida que deberá colocarse en las cribas contenga iguales proporciones de cada una de las partículas tal como en la muestra original más grande. El cuarteo se describe como sigue y se ilustra en la Fig. 138.

La muestra bien mezclada se amontona sobre una superficie amplia y lisa y luego se

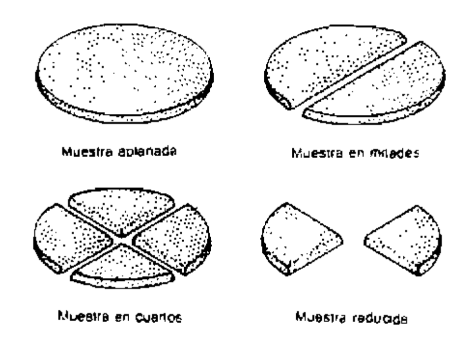


Fig. 138: Metodo de cuarteo para reducir el tamano de la muestra. Asi se divide exactamente la masa de material.

aplana, hasta darle una conformación circular parecida a la de un pastel.

La forma circular anterior se divide a la mitad. El próximo paso consiste en dividir a su vez, las dos mitades.

La muestra se divide a la mitad de su tamaño original, separando dos cuartos opuestos y mezclando las partes restantes. Si la muestra resulta aún muy grande, puede repetirse el cuarteo.

Para utilizarlo en el análisis, puede emplearse cualquier peso que resulte de la reducción de la muestra. No debe intentarse preparar una muestra de un peso predeterminado, tal como 200, 300 o 500 gramos.

Si la muestra ya reducida se halla húmeda, debe secarse a un fuego moderado, revolviéndola frecuentemente. Conforme el material se va secando, obsérvese si la arcilla causa que las partículas de arena se adhieran entre sí o no. Los grumos que pudieran formarse deben desmenuzarse para separar todas las partículas.

Escójanse unas cuatro o seis cribas con una serie de aperturas tal, que permita clasificar la muestra en varios tamaños. La criba más gruesa no deberá retener más de un 20 por ciento de la muestra. En la Fig. 139 se sugieren ciertos grupos de cribas. Las aberturas de las cribas de ensayo se designan tanto por el tamaño real de la abertura, en milésimas de pulgada o en milímetros, como por el número de las mallas de alambre que las constituyen.

Seguidamente se colocan las cribas de forma que la más fina quede en el fondo y la más gruesa en la parte superior de la sarta. Luego pésese la muestra desecada, anótese ese peso y vacíese la muestra de arena en la criba superior.

Agítese el conjunto de cribas con un movimiento circular y hacia arriba y abajo, acompañados de cierta acción vibratoria para que el material se agite sobre la superficie de cada criba. Esta acción hará que la malla de las cribas vibre, impidiendo que éstas se atasquen. Cuando se emplea el cribado manual, cada criba deberá agitarse individualmente además del conjunto, pero de ser posible, utilícese la agitación mecánica.

Vacíese luego el material retenido por la criba superior en un recipiente o en un pedazo grande de papel. Este material se pasa al platillo de la balanza y se pesa. En el registro se anota este peso y la correspondiente abertura de la malla en el cual el material fue retenido.

Vacíese a continuación la porción de la muestra retenida en la segunda criba y agréguese al material que se halla contenido en el platillo de la balanza. Obsérvese y anótese el peso combinado que resulta. Vacíese sucesivamente cada criba y regístrese el peso de la cantidad que se acumula en cada caso. Agréguese finalmente el material más fino acumulado en el recipiente del fondo y pésese de nuevo. Este peso final deberá con-



Fig. 139: Grupo sugerido de cribas para analizar muestras de arena o gravas acuíferas.

cordar con el de la muestra original, dentro de una tolerancia de 2 a 3 gramos.

El registro de los pesos acumulados de material, obtenido en una serie de cribas, sería tal como se muestra a continuación:

Tamaño de Abertura de la Criba Pulgadas y mm	Peso retenido acumulativo gramos	Porcentaje retenido acumulativo
0.046" (1.17 mm)	17%	65 g
0.033" (0.84 mm)	28%	106 g
0.023" (0.58 mm)	47%	179 g
0.016" (0.41 mm)	70%	266 g
0.012" (0.30 mm)	82%	312 g
0.008" (0.20 mm)	94%	357 g
Fundo	100%	380 g

Peso de la muestra original: 382 gramos.

Los datos anteriores pueden ahora plotearse en un papel adecuado, para obtener una gráfica.

El porcentaje retenido acumulativo de cada número de criba se plotea en el papel de gráfica especial, contra la abertura de la malla en milésimas de pulgada o en milímetros. Los puntos que así se obtienen se conectan mediante una curva suave, tal como se muestra en la Fig. 140.

Obsérvese que el "porcentaje retenido" constituye la escala vertical del gráfico y que la escala horizontal corresponde a la abertura de la malla o "tamaño de partícula". Se considera que el tamaño de la abertura de la malla es igual al diámetro de la menor partícula retenida por cada criba. Aunque esto no es estrictamente cierto, puesto que los granos de arena varían de forma, constituye una práctica muy generalizada el plotear el tamaño de la abertura como si fuese el mismo de la partícula de arena correspondiente.

La curva de análisis granulométrico muestra, en un solo vistazo, qué parte del material es menor o mayor que el tamaño de una partícula dada. Por ejemplo, se observa

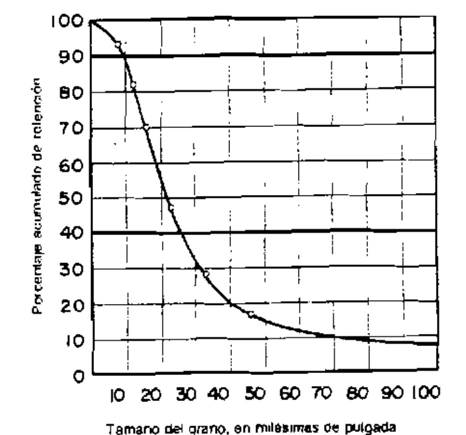


Fig. 140: Curva típica de análisis granulométrico de arena, que muestra la distribucion de los tamaños de grano en porcentaje de peso.

en esta curva que el 90 por ciento de la muestra consiste de granos de arena mayores que un tamaño de 0.010 pulgadas (0.254 mm) y que un 10 por ciento, es de un tamaño menor que el anterior. Si la curva se lee de otra manera, podríamos decir que un 40 por ciento de la arena es de un tamaño de 0.026 pulgadas (0.66 mm) o que el 40 por ciento de la muestra es más grueso que 0.026 pulgadas (0.66 mm) y un 60 por ciento es más fino que 0.026 pulgadas.

Las curvas de análisis granulométrico tienen muchas otras aplicaciones, no solamente en el campo de los pozos de agua. Se utilizan para representar la gradación de la arena usada en el concreto, materiales de tierra para terraplenes y represas, arenas filtrantes y para muchos otros tipos de materiales granulares. Los ingenieros de diferentes ramos utilizan diversas variantes en la forma de plotear las curvas. Se hace hincapié en este aspecto porque las personas a cargo de la perforación de pozos podrían tener ocasión de utilizar curvas de análisis granulométrico ploteadas en forma diferente a la que se ha discutido aquí.

Una de las variantes más comunes es la que utiliza el "porcentaje dejado pasar" por una criba determinada, para plotearlo en la escala vertical en lugar del "porcentaje retenido". Esta forma produce el efecto de invertir la curva de izquierda a derecha, de modo que su pendiente sube en la misma dirección en vez de descender. Una segunda variante consiste en utilizar una escala logarítmica para el tamaño de partícula o abertura de malla. Lo anterior produce el efecto de extender o elongar aquella parte de la curva que corresponde a la fracción más fina de la muestra y condensar la región de la curva que representa al material más grueso.

Las formas de las curvas se reconocen más fácilmente cuando éstas han sido ploteadas en un gráfico con escalas aritméticas.

El procedimiento lógico, en cualquier caso, es el de plotear en la escala vertical el porcentaje retenido en lugar del porcentaje dejado pasar. Este procedimiento permite utilizar los valores correspondientes en la misma forma en que los pesos acumulativos se registran en el laboratorio. Si se utiliza el porcentaje dejado pasar, los porcentajes retenidos deberán restarse de 100.

No se dispone de un solo término o expresión que pueda describir de una sola vez una arena o una mezcla de arena y grava. La razón de ello es que el material consiste de un rango completo de tamaños de partículas que sólo la curva pone en evidencia. Entre los límites definidos por los tamaños mínimo y máximo, los tamaños intermedios pueden distribuirse en tantas diferentes formas, que cada distribución cambiará el trazo de la curva.

Hablando en términos generales, existen tres elementos que son esenciales para describir completamente una gradación de arena. Uno de éstos es la "finura"; otro es "la pendiente de la curva de granulometría" y el tercero es la característica "forma de la curva". Cualquiera de estos elementos podría variar independientemente de los otros, y ello es lo que hace necesario el tener que utilizar los tres para una representación completa de la gradación del material.

Al tratar de describir la finura o la tosquedad de un material granular, nos referimos a arena fina, arena gruesa, grava fina y así sucesivamente. Desafortunadamente, rara vez pensamos en términos de un límite impuesto por una partícula de determinado tamaño, para definir cada uno de estos materiales. El resultado de ello es que lo que una persona denomina arena gruesa, puede ser considerado grava fina por otra.

Para disponer de una definición específica para cada término descriptivo, se han desarrollado varias clasificaciones diferentes del tamaño de los granos. Cada uno de estos sistemas se ha adoptado para aplicarlo a

aquellos campos específicos en donde pareciera que se ajusta mejor.

La clasificación del MIT, desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y la de la Oficina de Suelos de los Estados Unidos, son las dos que se utilizan más comúnmente.

Una parte de cada una de ellas se da en la tabla siguiente:

Clasificacion	Limites del Tamaño del Grano			
	Sistéma del MIT Pulg y mm.		Sistema de la Oficina de Suelos Pulg y mm.	
Grava fina	0.080 hasta 2.03	3/8 9.52	0.040 hasta 1.02	0.080 2.03
Arena gruesa	0.024 0.61	0.080 2.03	0.020 0.51	0.040 1.02
Arena mediana	0.010 0.25	0.024 0.61	0.010 0.25	0.020 0.51
Arena fina	0.003 0.08	0.010 0.25	0.004 0.10	0.010 0.25
Limo y Arcilla	Por debajo de	0.003 0.08	Por debajo de	0.002 0.05

El Servicio Geológico de los Estados Unidos siguió en un principio la clasificación de la Oficina de Suelos al describir los tamaños de arenas y gravas. En años recientes, sin embargo, la División de Aguas Subterráneas del Servicio, ha venido utilizando la siguiente clasificación:

Clasificación	Granulometría			
	Milímetros		Pulgadas	
Grava	Por encima de	2.0	Por encima de	0.080
Arena muy gruesa	1.0 hasta	2.0	0.040 hasta	0.080
Arena gruesa	0.5	1.0	0.020	0.040
Arena mediana	0.25	0.5	0.010	0.020
Arena fina	0.125	0.25	0.005	0.010
Arena muy fina	0.076	0.125	0.003	0.005
Limo y Arcilla	Por debajo de	0.076	Por debajo de	0.003

Estos límites fueron impuestos por una subcomisión del Consejo Nacional de Investigaciones al tratar la terminología de los sedimentos.

La curva de la Fig. 140 indica que la muestra analizada consiste de arenas gruesa y mediana, de acuerdo con la clasificación del Servicio Geológico. Si se aplica el mismo sistema de clasificación a las cuatro curvas mostradas en las Figs. 141 hasta 144, se obtienen las siguientes descripciones:

Curva Clase A — Arena fina

Curva Clase B — Arenas fina y muy gruesa

Curva Clase C — Arenas gruesa y muy gruesa

Curva Clase D— Arena y grava

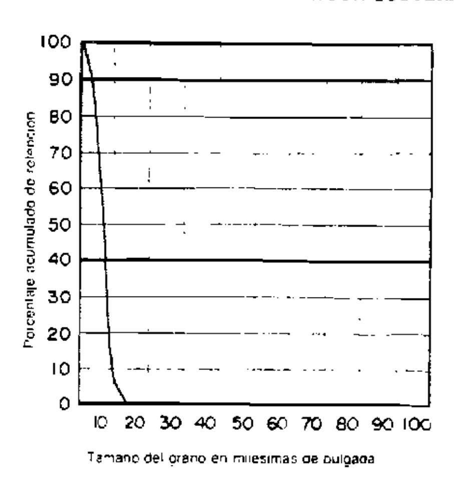


Fig. 141: Curva Clase A, que es típica de la arena fina y uniforme que eroga cantidades limitadas de agua.

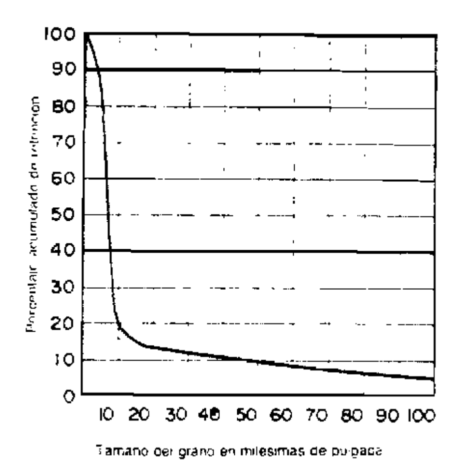


Fig. 142: Curva Clase B, que muestra una arena fina con un contenido de partículas gruesas de 10 a 20 por ciento.

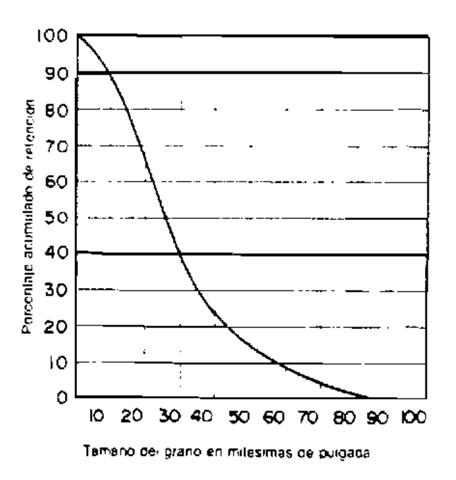


Fig. 143: Curva Clase C, característica de una mezcla de arenas mediana y gruesa y de buena permeabilidad.

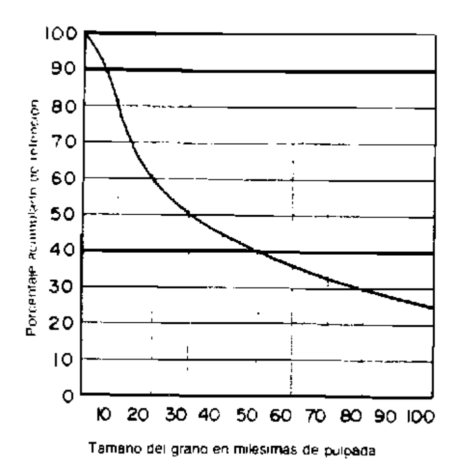


Fig. 144: Curva Clase D, sui generis de una mezcla de arena y grava de buena permeabilidad.

La clasificación del Servicio Geológico podría adoptarse para uso estándar en la industria de pozos de agua y suministraría un grupo consistente de términos para describir las arenas y gravas de los acuíferos.

Cierto punto específico de la curva granulométrica se utiliza también como índice general de finura. Expresado como tamaño de un grano, tal valor se emplea a menudo al tratar de correlacionar la finura o bastedad de la arena con su permeabilidad o aptitud para ceder agua. Tal valor se denomina tamaño efectivo.

El término *tamaño efectivo* fue ideado por Allen Hazen al estudiar las arenas filtrantes en 1892. Este término fue definido por

Hazen como un tamaño de partículas tal, que un 10 por ciento de la arena es más fino que dicho tamaño y 90 por ciento es más grueso. En las curvas, tal como aquí se muestran, ese tamaño es el correspondiente al 90 por ciento. En la curva de la Fig. 140, el tamaño efectivo de la arena es de 0.010 pulgadas (0.254 mm). En la Curva Clase A de la Fig. 141, el tamaño efectivo resulta ser de 0.003 pulgadas (0.076 mm).

Otro punto de la curva que se usa como índice de finura, es el tamaño correspondiente al 50 por ciento, que en la curva de la Fig. 140 es de 0.022 pulgadas (0.056 mm). En las curvas Clase A y Clase B, el tamaño correspondiente al 50 por ciento es de 0.007 pulgadas (0.178 mm) en ambos casos.

Cuando se trata de materiales regularmente uniformes, o sea, cuando la mayor parte de la curva granulométrica de una arena es bastante empinada, el tamaño correspondiente al 50 por ciento puede considerarse que es igual al de la partícula media o promedio de la arena. Sin embargo, cuando la pendiente general de la curva es más aplanada, tal como la de la curva Clase D de la Fig. 144, el tamaño correspondiente al 50 por ciento resulta inexacto al tratar de indicar con éste la finura o la bastedad.

Pendiente y Forma de la Curva Granulométrica

La pendiente de la porción mayor de la curva granulométrica puede expresarse de diversas maneras. Un término que se usa muy extensamente, es el de coeficiente de uniformidad, ideado por Hazen al mismo tiempo que adoptó la idea del tamaño efectivo. El *coeficiente de uniformidad* se define y se calcula como el cociente que resulta de dividir un tamaño de arena correspondiente al 40 por ciento, entre el tamaño dado, por el 90 por ciento (o sea, el tamaño efectivo). En la curva de la Fig. 140, el coeficiente de uniformidad es el que se obtiene al dividir 0.026 pulgadas (0.66 mm) por 0.010 pulgadas (0.254 mm), o sea, 2.6. En la Curva Clase B, el coeficiente de uniformidad es de 2.0; en la curva Clase C, su valor es de 3.0.

El coeficiente de uniformidad representa la pendiente promedio de la curva granulométrica en la región comprendida entre los tamaños correspondientes al 90 y 40 por ciento. Cuanto más bajo su valor, más uniforme será la gradación de la arena, entre estos límites. Los valores más grandes indican una gradación menos uniforme. Al igual que el tamaño efectivo, el coeficiente de uniformidad queda limitado para usarse en aquellos materiales que tienen una gradación uniforme. Probablemente sólo debería emplearse cuando su valor es menor de 5.0. Se ajusta admirablemente para describir el grado deseado de uniformidad de los materiales empleados en filtros de grava, puesto que para ello se necesita un material uniformememte gradado.

En la mayoría de los materiales granulares que se han depositado en agua corriente y por la acción de las olas, la curva granulométrica ostenta la forma de una S. Esta forma se distorsiona cuando el material se halla constituido por una mezcla de arena y grava cuyo contenido de grava es de alrededor de un 15 por ciento o mayor. La Curva de la Fig. 140 y las curvas Clase A y C, son características de la conformación en S. La curva Clase D es una conformación típica con una "cola" de material grueso. Aquellas gradaciones que muestran forma de S, tienen por lo general una mayor porosidad que los materiales cuya curva exhibe una "cola".

Hasta el momento no existe una manera precisa de calcular la permeabilidad mediante el empleo directo de una curva granulométrica. Se han realizado gran cantidad de ensayos y estudios investigativos para tratar de establecer una relación simple

entre la gradación de una arena y su permeabilidad, pero aún no se ha descubierto ninguna correlación digna de confianza que se pueda aplicar. No obstante, con cierta experiencia es posible entrever algunas de las aptitudes relativas de la arena y de las mezclas de arena y grava para brindar agua, si se consideran cuidadosamente los tres factores que se han explicado en detalle en este capítulo.

Referencias

1. BURMISTER, Donald M., "Identification and Classification of Soils," ASTM, Special Technical Publication No. 113 (1951), American Society for Testing Materials, Philadelphia.
2. "Symposium on Permeability of Soils," ASTM, Special Technical Publication No. 163 (1954), American Society for Testing Materials, Philadelphia.
3. HAZEN, Allen, "Some Physical Properties of Sands and Gravels," Mass. State Board of Health, 24th Annual Report (1893).

Capítulo 10

Diseño de Pozos de Agua

El DISEÑO de un pozo de agua implica escoger los factores dimensionales apropiados para la estructura de éste y de los materiales que se van a utilizar en su construcción. Un buen diseño exige la seguridad de una combinación óptima de comportamiento, larga vida de servicio y un costo razonable. Una sana práctica de ingeniería demanda que estos objetivos sean considerados en conjunto.

Las guías de diseño que aquí se ofrecen, se refieren primordialmente a aquellos pozos dotados de rejilla emplazadas en materiales no consolidados. Comparativamente, los pozos ubicados en formaciones de rocas consolidadas y construidos con rejilla, exigen el tener que considerar mayor número de detalles de diseño. Sin embargo, los mismos principios básicos se aplican en ambos casos.

Deben analizarse cuidadosamente los factores técnicos y los relativos al costo. No sería una buena práctica ingenieril proyectar, por ejemplo, un pozo que erogara 1,200 litros por minuto para abastecer a una vivienda suburbana que necesite 60 litros por minuto para satisfacer las necesidades del propietario. Asimismo, resulta una práctica deficiente escoger un tamaño inadecuado del ademe del pozo o de la rejilla, o utilizar materiales de calidad inferior, únicamente con el propósito de reducir los costos iniciales. De proceder así, ello acarrearía al propietario mayores gastos de bombeo y mantenimiento y reduciría la vida útil del pozo. Cualquier inversión adicional que dé por resultado un pozo bien diseñado y eficiente, producirá, a no dudarlo, la máxima economía a cierto plazo.

La mayor parte de la discusión que tendrá lugar a continuación se refiere al diseño de pozos municipales, industriales o de riego. Tales pozos deben por lo general diseñarse para obtener de ellos el mayor rendimiento disponible en el acuífero y la mayor eficiencia, en términos de capacidad específica. Estos factores inciden directamente en los costos de operación. Otro factor de costo importante, en este tipo de instalaciones, es el de las pérdidas monetarias que pueden resultar de la interrupción del servicio, especialmente en aquellos abastecimientos grandes de agua. Un buen diseño reduce este peligro, ya que

logra incorporar al pozo aquellas características que la aseguren una larga vida exenta de problemas.

Separadamente se discutirán los factores especiales de diseño que se relacionan con los pozos más pequeños, tales como los de uso domiciliario, agropecuario y comercial.

Resulta de utilidad considerar al pozo como una estructura que consiste de dos elementos principales. Uno de estos elementos está constituido por aquella parte del pozo que sirve como alojamiento del equipo de bombeo y como conducto vertical a través del cual fluye el agua en su movimiento ascendente desde el acuífero, hasta el nivel en que hace su entrada a la bomba. Por lo general, ésta es la parte ademada del pozo, aunque en algunos casos, una fracción de esta longitud puede permanecer libre de ademe, si el pozo se ha construido dentro de materiales consolidados.

El otro elemento principal, es el intervalo de captación del pozo. Puesto que este es el lugar en donde el agua proveniente del acuífero hace su entrada al pozo, su diseño demanda una consideración muy cuidadosa de los factores hidráulicos que influyen en el comportamiento del pozo. Lo anterior se aplica especialmente a un pozo que deriva agua de una formación no consolidada, tal como la arena. En tal caso, se emplea una rejilla, la cual actúa como captación en la estructura de éste.

Una rejilla de pozo que se halle adecuadamente construida, permite que el agua haga su entrada al pozo libremente y a baja velocidad, evitando así que la arena penetre al pozo junto con el agua y sirve además como retenedor estructural que soporta el material suelto.

En un acuífero constituído por roca consolidada, el pozo por lo general viene a ser un agujero perforado dentro del acuífero hasta una profundidad adecuada. El rendimiento de tal pozo variará con el número, tamaño y continuidad de las aberturas que se encuentren en la roca y que aparecen al perforar el agujero dentro del acuífero.

Diametro del Pozo

El escoger el diámetro apropiado del pozo es algo muy importante, pues éste afecta significativamente el costo de la obra. Puede que el pozo sea o no del mismo diámetro desde la superficie hasta el fondo. Una vez comenzada la perforación con un ademe de tamaño dado, puede que las condiciones de la misma u otros factores hagan necesario tener que reducir el diámetro a cierta profundidad y terminar el tramo inferior del pozo en uno menor.

El diámetro del pozo debe escogerse de modo que se satisfagan dos requisitos.

1. El ademe debe ser lo suficientemente amplio para que permita acomodar la bomba con la tolerancia adecuada para su instalación y eficiente funcionamiento.

2. El diámetro del intervalo de captación del pozo debe ser tal que garantice una buena eficiencia hidráulica del mismo.

Al escoger el tamaño del ademe, el factor que gobierna es, por lo general, el tamaño de la bomba que va a necesitarse para la descarga deseada o potencial del pozo. El diámetro del ademe debería ser de dos números mayor que el diámetro nominal de la bomba. Bajo ninguna circunstancia deberá escogerse un diámetro menor de por lo menos un número más grande que los tazones de la bomba.

La Tabla XXIII muestra los tamaños de ademe que se recomiendan para diversos rangos de rendimiento o caudal de bombeo. Al elaborar la tabla, se estableció primero el tamaño de tazón de la bomba más eficiente que debería utilizarse para bombear una determinada cantidad de agua. El tamaño óptimo de ademe se escogió luego de un diámetro dos números más alto que el mejor tamaño de tazón. Se han tenido también en cuenta la velocidad y las pérdidas de carga que resultan del movimiento vertical del

Tabla XXIII
Diametros Recomendados de Pozo

Produccion Prevista del Pozo m^3/min	Diametro Nominal de los Tazones de la bomba en cm.	Diámetro Optimo del Ademe del Pozo en cm.	Minimo Diámetro de Ademe en cm.
Menos que 0.4	10.0	15.0 ID	12.5 ID
0.3 a 0.7	12.5	20.0 ID	15.0 ID
0.6 a 1.5	15.0	25.0 ID	20.0 ID
1.5 a 2.5	20.0	30.0 ID	25.0 ID
2.3 a 3.4	25.0	35.0 OD	30.0 ID
3.2 a 5.0	30.0	40.0 OD	35.0 OD
4.5 a 6.8	35.0	50.0 OD	40.0 OD
6.0 a 12.0	40.0	60.0 OD	50.0 OD

ID = Diametro interior OD = Diámetro exterior

agua desde el fondo del pozo hasta la captacion de la bomba, a través de la tubería. Estas pérdidas son pequeñas en el caso de utilizar los caudales y los tamaños de tubería indicados en la tabla.

Si el tamaño del ademe se escoge de acuerdo con la tabla, existirá una luz adecuada para la instalación de la turbina vertical; el eje de la misma constituirá la plomada y no se forzará la bomba, aunque el ademe se halle ligeramente fuera de línea y no exactamente a plomo. Esta luz o tolerancia es plenamente adecuada para bombas sumergibles. Asimismo, si la bomba se emplaza por debajo de alguna sección enrejillada, habrá suficiente área alrededor de los tazones como para permitir que el agua pase hacia abajo hasta la captación de la bomba con un mínimo de pérdidas de carga.

En aquellos pozos profundos en que se manifiesta tanto un alto nivel estático como dinámico, el ademe del pozo puede reducirse a cierta profundidad por debajo del nivel previsto de colocación de la bomba. Esto se hace en muchos pozos que interceptan acuíferos artesianos en los cuales la presión es relativamente alta.

Profundidad del Pozo

La profundidad que se espera darle al pozo se determina por lo general mediante el registro del pozo de prueba, de los registros de otros pozos cercanos en el mismo acuífero o durante la perforación del pozo de producción. Generalmente el pozo se termina en el fondo del acuífero. Esto es de desear, por las dos razones siguientes:

- Se utiliza mayor espesor del acuífero como intervalo de captación del pozo, lo que mejora su capacidad específica.
- Puede obtenerse mayor abatimiento disponible, permitiendo al pozo erogar más caudal.

Una excepción a esta regla se presenta cuando la rejilla se sitúa centrándola entre las partes superior e inferior del acuífero, práctica que a veces se sigue para lograr un uso más eficiente de una cierta longitud de rejilla en un acuífero artesiano uniforme.

Otra condición que se aparta de la regla básica es la de encontrar agua de mala calidad en la parte inferior del acuífero. En tal caso, el pozo deberá completarse hasta una profundidad que excluya esa agua y obtener así la mejor calidad que se encuentre disponible. Cualquier intervalo del agujero que se haya perforado dentro de aquella sección del acuífero que contiene agua de mala calidad, deberá rellenarse cuidadosamente para que el agua no emigre hacia arriba cuando se bombee el pozo. El material de relleno deberá ser relativamente impermeable. A su vez, deberá compactarse sólidamente de modo que soporte a la rejilla, sin asentamiento de ésta.

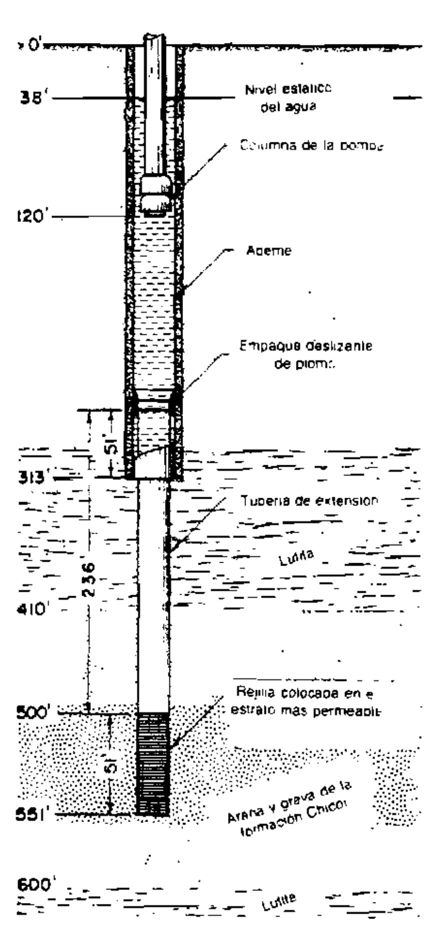


Fig. 145: Un pozo diseñado para 410 m³/hora, con su rejilla escogida y colocada para derivar la mayor ventaja de la parte más permeable de acuífero; en este caso se podía permitir una reducción del diámetro de la rejilla.

Longitud de la Rejilla

La longitud óptima de rejilla debe escogerse con relación al espesor del acuífero, abatimiento disponible y estratificación de la formación. Las reglas que siguen se pueden aplicar a cuatro situaciones típicas:

Acuífero Artesiano Homogéneo: En este tipo de acuífero, deberá enrejillarse de un 70 a un 80 por ciento del espesor del material acuífero, suponiendo que el nivel del agua no descienda por debajo del techo de éste. Una buena práctica de diseño nos indica que el máximo abatimiento disponible de un acuífero artesiano debe ser igual a la distancia entre el nivel estático y el techo del acuífero.

Si el acuífero tiene menos de unos 8 metros de espesor, es suficiente con enrejillar el 70 por ciento. Si su espesor se halla comprendido entre 8 y 15 metros, deberá colocarse rejilla en un 75 por ciento de éste, y si es mayor de 15 metros, deberá enrejillarse no menos del 80 por ciento. Las longitudes de rejilla indicadas por esta regla, harán posible el captar alrededor del 90 por ciento o más, de la máxima capacidad específica que se podría obtener al enrejillar todo el acuífero (Véase página 150, Capitulo 6).

Los mejores resultados se obtienen al centrar la rejilla en el acuífero, o dividiendo ésta en tramos de igual longitud, intercalados con secciones de tubería de ademe ciega. (Véase Fig. 94).

Acuífero Artesiano Heterogéneo: En este tipo de formación acuífera, obviamente lo mejor es enrejillar el estrato más permeable. La determinación del estrato más permeable o productivo puede por lo general efectuarse mediante una o más de las siguientes técnicas:

1. Se realizan pruebas de permeabilidad de las muestras que representen los estratos respectivos de la formación acuífera. En estos ensayos de laboratorio, se hace circular agua a través de una muestra del material. Para calcular la permeabilidad, se efectúan mediciones del área de la sección transversal a través de la cual tiene lugar el flujo del caudal y de la pérdida de carga correspondiente.

2. Se realizan análisis granulométricos de aquellas muestras que representan los correspondientes estratos de la formación. Mediante una comparación de las curvas granulométricas, se deduce la permeabilidad relativa de cada muestra. Si las pendientes de

las curvas granulométricas son casi iguales, la permeabilidad relativa puede estimarse comparando los cuadrados de los tamaños efectivos de las muestras. De acuerdo con lo anterior, una arena que tenga un tamaño efectivo de 0.008 pulgadas, (0.203 mm), tendrá alrededor de 4 veces la permeabilidad de otra arena cuyo tamaño efectivo sea de 0.004 pulgadas (0.102 mm). El tamaño efectivo es igual al diámetro de un grano de tal magnitud, que el 10 por ciento de la muestra, por peso, se halla constituido por granos de tamaño menor y el 90 por ciento por granos mayores. El tamaño efectivo se determina fácilmente mediante la curva de granulometría. Corresponde a aquel tamaño dado por la intersección de la curva con la línea horizontal que representa el 90 por ciento retenido. En la muestra representada por la Fig. 146, el tamaño efectivo del grano resulta ser ligeramente mayor que 0.002 pulgadas (0.051 mm).

En el caso de que todas las muestras tengan alrededor del mismo tamaño efectivo, aquellas curvas con las pendientes más empinadas indicarán, por lo general, los

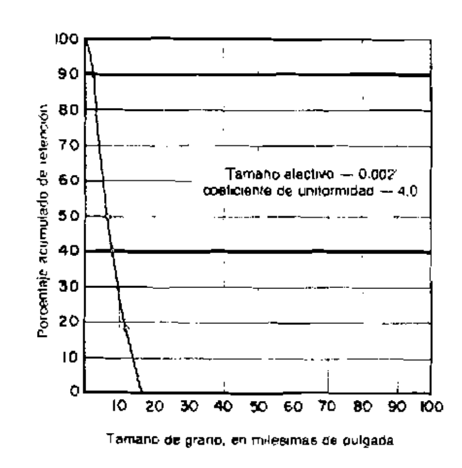


Fig. 146: El tamaño efectivo de una arena es el tamaño de grano dado por la intersección de la curva con la horizontal correspondiente al 90 por ciento de retención. El coeficiente de uniformidad es el tamaño correspondiente al 40 por ciento de retención, dividido por el tamaño efectivo.

materiales más permeables. Una curva que tienda más a la vertical, representa una arena de gradación más uniforme. La mayor uniformidad en el tamaño de los granos aumenta la permeabilidad siempre que los otros factores permanezcan constantes.

3. Se hace luego una inspección visual y una comparación, de los materiales que representan a cada estrato. La permeabilidad relativa de cada uno se estima mediante una apreciación de la basjedad y limpieza (ausencia de limo y arcilla) del material.

Las tres técnicas anteriores se han descrito en el orden de su grado de confianza, que a su vez es el mismo orden de su costo, esto es, que la primera de ellas es la más confiable y al mismo tiempo la más costosa. Los factores económicos que gobiernan la obra son los mismos que indicarán cuánto gasto está justificado hacer para determinar con la mayor precisión los intervalos favorables del acuífero. Se recomienda vehementemente que, por lo menos, se efectúen análisis granulométricos de las muestras de la formación, en el caso de pozos industriales, municipales o de riego.

Acuífero Freático Homogéneo: Tanto la teoría como la experiencia han demostrado que al enrejillar el tercio inferior del acuífero se obtiene el mejor diseño para esta condición. En algunos pozos, sin embargo, se puede enrejillar la mitad inferior del acuífero para obtener una mayor capacidad específica. En ciertos casos, se prefiere una mayor eficiencia a un mayor rendimiento.

En los pozos de nivel freático, la selección de la rejilla representa algo así como una alternativa de dos factores. Por un lado, se obtiene la mayor capacidad específica cuando se usa la mayor longitud posible de rejilla. Ello hace que se reduzca la convergencia del flujo y la velocidad de acceso, obteniéndose en consecuencia una mayor capacidad específica. Por otro lado, si se utiliza la menor longitud posible de rejilla, se cuenta entonces con un mayor abatimiento disponible. Ambas posibilidades quedan

satisfechas, en parte, mediante el uso de una rejilla eficiente.

El abatimiento disponible es la distancia comprendida entre el nivel estático del agua y el plano superior de la rejilla o un punto algo por encima de éste. Por lo general, un pozo freático se bombea de modo que el nivel dinámico o de bombeo se mantenga en, o un poco arriba, del extremo superior de la rejilla. La rejilla se enfrenta a la porción inferior o de fondo, del acuífero, puesto que la zona superior de éste necesariamente se deseca al desplazarse el agua hacia el pozo.

La Fig. 147 nos muestra un pozo de nivel freático adecuadamente diseñado para una formación homogénea. Este pozo fue previsto para un bombeo continuo de 340 m³/hora.

La Fig. 73 del Capítulo 6, indica cómo resulta impráctico bombear un pozo de nivel freático con un abatimiento que exceda de los dos tercios del espesor del acuífero. El ejemplo mostrado en la Fig. 73, indica que a un abatimiento del 65 por ciento del máximo, el pozo produciría un 88 por ciento del máximo rendimiento. Si el abatimiento se aumentara al 95 por ciento del disponible, el rendimiento del pozo se vería aumentado hasta un 99 por ciento de su máximo posible. En esta forma, un 46 por ciento de aumento en el abatimiento, induce solamente un 11 por ciento de incremento en la producción.

Acuíferos de Nivel Freático Heterogéneos: Los principios de diseño que se aplican a los acuíferos artesianos heterogéneos, se utilizan también en el diseño de pozos perforados en acuíferos freáticos heterogéneos. La única variación, en el caso de un acuífero freático, es la posición de la rejilla o tramos de ésta, que esta vez deben colocarse en los intervalos inferiores más permeables, para disponer así del máximo abatimiento.

Abertura de las Ranuras de la Rejilla

En aquellos pozos desarrollados en forma natural, las aberturas de las rejillas se

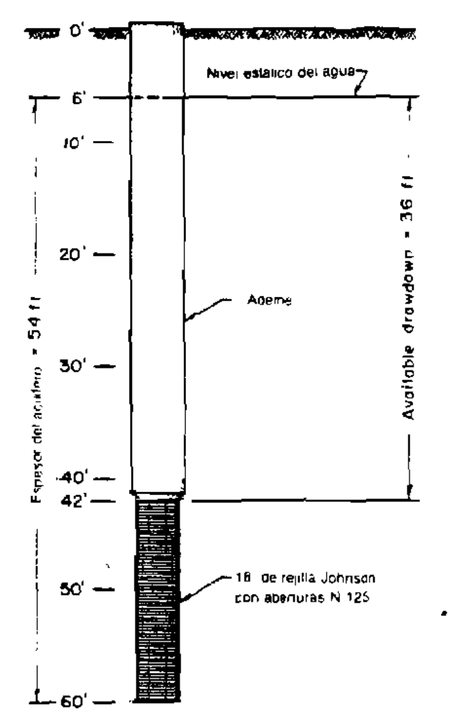


Fig. 147: Una buena seleccion de la longitud de rejilla es aquella que corresponda aproximadamente a un tercio del espesor saturado de un acuífero freático homogéneo.

escogen mediante un análisis granulométrico de las muestras representativas de la formación. Para cada muestra, se plotea una curva granulométrica. En una formación homogénea que consista de arena uniforme, la abertura de la rejilla (a menudo denominado el tamaño de ranura), se escoge como aquel que retendría entre un 40 ó 50 por ciento de la arena.

Para determinar la abertura correcta de la ranura, solamente se necesita escoger un punto de la curva en que la línea horizontal correspondiente, ya sea a un 40 ó un 50 por ciento, intersecte a la curva de granulometría y luego determinar la correspondiente abertura de rejilla en la escala horizontal de tamaños. La Fig. 146 constituye un ejemplo de una curva granulométrica correspondiente a una arena fina y uniforme. En una rejilla que

se fuese a instalar en esta arena, el tamaño apropiado de ranura sería de 0.008 pulgadas (0.203 mm) si se quisiera retener un 40 por ciento de la arena y de 0.006 pulgadas, (0.152 mm) si se pretendiese retener un 50 por ciento.

Cuando el agua subterránea no es particularmente corrosiva, se escoge por lo general un 40 por ciento de retención, siempre que se tenga confianza en la muestra. Por otra parte, se prefiere un 50 por ciento cuando el agua es extremadamente corrosiva o si se tienen dudas acerca de cuán representativa es la muestra. Cuando el agua es corrosiva, resulta aconsejable la solución más conservadora, puesto que el aumento de solamente unas pocas milésimas de pulgada o fración de milímetro, debido a la corrosión, causaría la invasión de arena al pozo.

En una formación homogénea que consista de arena gruesa y grava, el diseñador dispone de amplio margen para escoger las aberturas de las ranuras. La curva granulométrica de arena y grava juntas, es más aplanada que la correspondiente a una arena fina. Cualquier variación de unas pocas milésimas en el tamaño de la ranura permitirá, en tal caso, que solamente una pequeña diferencia de cantidad de material pueda pasar a través de la rejilla durante el desarrollo del pozo. En consecuencia, las aberturas de ranura que se escojan deberán hallarse entre los tamaños de arena correspondientes a un rango de 30 a 50 por ciento de retención. Si las aberturas escogidas solamente retienen un 30 por ciento, mayor cantidad de material pasará al pozo durante el proceso de desarrollo. Ello hace que el tiempo necesario para esta labor, aumente. Sin embargo, una de las ventajas que se obtienen al escoger una rejilla con un tamaño mayor de abertura es la de eliminar el costo de una labor de sobre-desarrollo. Cuando el agua es de características incrustantes, la vida útil del pozo también puede extenderse más allá del momento en que la obstrucción empiece a reducir el rendimiento del mismo. Los tamaños grandes de ranura hacen también posible que se desarrolle una zona de material más grueso alrededor de la rejilla. Esto causa, por lo general, un aumento de la capacidad específica del pozo, haciéndolo más eficiente.

Cuando se tienen dudas acerca de la confianza en las muestras, si el acuífero es

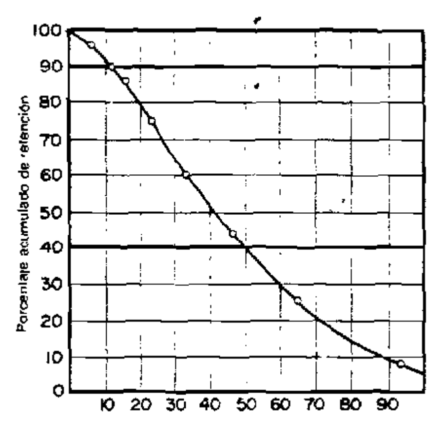


Fig. 148: Mediante esta curva granulométrica, se seleccionará el No. 60 (0.060 pulg., 1.524 mm) de abertura de ranura para la rejilla de un pozo desarrollado en forma natural.

delgado y sobreyacido por material suelto y de granulometría fina, o cuando el tiempo de desarrollo es de interés, se requiere escoger un tamaño de abertura de rejilla en forma más conservadora. En estas condiciones es preferible un tamaño de abertura de ranura que retenga de un 40 a un 50 por ciento del material del acuífero.

En la naturaleza se presentan por lo general las formaciones heterogéneas o acuíferos estratificados. Cuando se trate de una formación de este tipo, las aberturas de ranura de los diversos tramos de una rejilla de pozo se escogen de modo que se ajusten a la gradación de los materiales de todos los estratos. Cada sección de rejilla debe contener aberturas tales que se ajusten al

material de cada estrato individual, de acuerdo con el criterio ya descrito, que se utiliza en la arena fina y uniforme, en la más gruesa y en la grava. Sin embargo, al escoger las aberturas de una rejilla de diversas ranuras, conviene aplicar dos reglas adicionales, que son las siguientes:

Regla 1. Si el material fino descansa sobre material grueso, debe extenderse la rejilla que tiene su abertura diseñada para el material fino por lo menos unos 0.60 m. dentro del material más grueso que se halle por debajo.

Regla 2. Si el material fino reposa sobre un material grueso, el tamaño de ranura del tramo de rejilla que va a instalarse en el estrato de granulometría gruesa no deberá ser mayor que el doble de la abertura de ranura que se emplee para el material fino.

La aplicación de estas dos reglas reduce la posibilidad de que el pozo pueda bombear arena, en el caso de que la profundidad de la parte superior y la del fondo, de cada estrato diferente, no hayan sido determinadas con exactitud. Las guías para escoger el tamaño de la ranura indican que alrededor de un 60 por ciento del material de la formación pasa a través de la rejilla durante el proceso de desarrollo. La eliminación de esta fracción de material da por resultado cierto asentamiento del que se halla alrededor de la rejilla. Esto también le permite al material de arriba que se asiente un poco. La posición del estrato más fino sobreyaciente se desplaza ligeramente hacia abajo conforme tiene lugar el asentamiento.

La Fig. 149 ilustra lo que puede suceder si no se aplica la primera de las dos reglas anteriores. En este caso, aquella sección de rejilla cuyas aberturas fueron diseñadas para ajustarse a la arena más gruesa, empieza a la profundidad en que tiene lugar el cambio de formación, o sea, el contacto entre ambos estratos. Conforme se remueve la parte fina del material más grueso durante el desarrollo, puede ocurrir el asentamiento de la capa de arena fina que yace por encima. Ello puede fácilmente ocasionar que la parte superior de rejilla que contiene las mayores aberturas se ponga en contacto con la arena fina, permitiendo la invasión continua de arena al pozo.

Un ejemplo nos ilustrará mejor la aplicación conjunta de ambas reglas. Las curvas granulométricas de la Fig. 150 representan las gradaciones de dos estratos que constituyen un acuífero artesiano de 8 metros de espesor. Un buen diseño exigiría el enrejillamiento de los 5.5 metros inferiores de la formación, lo que significa

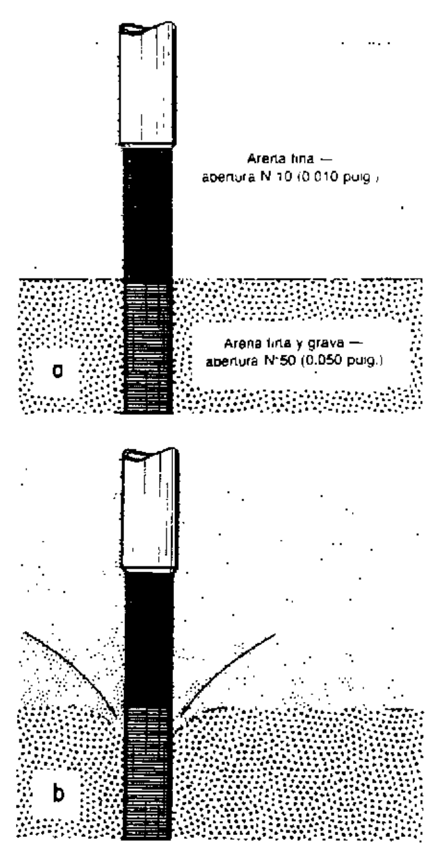


Fig. 149: La rejilla de la parte inferior de un acuífero estratificado (a) debe ser mas corta que el espesor de la arena más gruesa para evitar la condición (b) en que se muestra la posibilidad de que la arena fina penetre a la parte superior de la rejilla, después de desarrollar el pozo.

que algo más de la mitad de la longitud de la rejilla, ha de colocarse en el intervalo más permeable del acuífero. Para evaluar fácilmente la situación, resulta conveniente disponer la información que se tiene, en un cuadro de diseño.

En éste se anotan primero la profundidad y el espesor de cada estrato, el tamaño efectivo de los granos de cada muestra y el tamaño correspondiente al 40 por ciento de retención en cada caso. A continuación, se anota el cuadrado del tamaño efectivo, para indicar la permeabilidad relativa de cada muestra. Después se anota un rango de aberturas de ranura que comprenda valores superiores e inferiores correspondientes al 40 por ciento de retención. Estos son los valores que podrían considerarse al escoger una rejilla para cada estrato individual, ignorando la existencia de los otros estratos que se hallen por encima o por debajo.

Los tamaños de abertura de ranura de una rejilla que fuera a utilizarse en una formación consistente de sólo dos estratos, pueden escogerse fácilmente sin tener que recurrir a una tabla de diseño. Sin embargo, esta tabla resulta muy útil cuando se debe comparar un crecido número de muestras de material de diversa gradación.

Una rejilla de 5.5 m. de longitud, que se instalase en la parte inferior del acuífero, tendría su extremo superior a una profundidad de 33 m. La elección del tamaño de las aberturas empieza por la parte superior. En este ejemplo se supondrán condiciones promedio, de modo que el diseño se basa en la premisa de que se va a retener un 40 por ciento del material. La sección de rejilla en el estrato superior, debería contener aberturas No. 30 (0.762 mm) y la correspondiente al estrato inferior, aberturas No. 80 (2.03 mm).

Al aplicar la Regla 1, las aberturas más finas deberán extenderse hacia abajo y traslaparse con el material más grueso, durante una distancia de por lo menos 0.60 m. Ello haría que el extremo inferior del tramo de rejilla con aberturas No. 30 se hallase a 36 m. de profundidad. Los 3 m. superiores de rejilla, en consecuencia, deberán contener aberturas del No. 30 y colocarse desde 33 m. hasta 36 m. de profundidad.

Si no fuese por lo que indica la Regla 2, las ranuras de abertura No. 80 podrían haberse escogido para los 2.5 metros inferiores de la rejilla. Puesto que 80 es más de dos veces 30, lo anterior infringiría la Regla 2. Para sujetarse a ésta, se necesitaría instalar un tramo de transición de por lo menos 30 cm. de longitud y de abertura No. 60 (1.52 mm) para pasar de la abertura No. 30 a la No. 80. A continuación se muestra la elección completa de las aberturas de rejilla:

3 m del No. 30, desde 33 m hasta 36 m.

0.3 m del No. 60, desde 36 m hasta 36.3 m.

2 m del No. 80, desde 36.3 m. hasta 38.3 m.

El diseñador de pozos deberá siempre diseñar la rejilla para que ésta se ajuste a las condiciones acuíferas del pozo, ya que no implica ningún costo adicional el empleo de una rejilla de múltiples tamaños de abertura. Si se utilizan las aberturas apropiadas para que se ajusten a cada estrato, se obtendrá la máxima capacidad específica posible y se

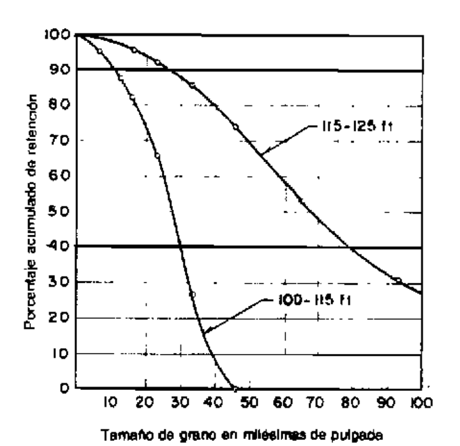


Fig. 150: Curvas granulométricas que representan porciones fina y gruesa de un acuífero estratificado de arena.

Tabla XXIV
Tabla de Diseño para Escoger las Aberturas

Profundidad m.	Espesor m.	Tamaño Efectivo mm.	Cuadrado del tamaño efectivo mm.²	Aberturas Posibles de Rejilla mm 40% de		
				Mínima	Retención	Máxima
30 a 35	4.6	0.254	0.065	0.71	0.76	0.76
35 a 38	3.	0.660	0.436	1.73	2.03	2.41

reducirán grandemente las posibilidades de invasión de arena al bombear el pozo.

Diámetro de la Rejilla

En los análisis de la hidráulica de pozos del Capítulo 6, hemos visto que el diámetro del intervalo de captación de un pozo puede variar sin que ello afecte grandemente su capacidad específica. Al duplicar el diámetro de ese intervalo, o sea, la rejilla, la capacidad específica aumentará escasamente en un 10 por ciento, si los otros factores permanecen inalterados.

El diámetro de la rejilla se escoje con miras a cumplir con un principio básico y que consiste en que se debe proveer suficiente área de entrada para que la velocidad de acceso del agua al pozo no exceda de un cierto valor estipulado. El diámetro de la rejilla constituye un factor que podría variarse una vez que la longitud y el tamaño de las aberturas hayan sido escogidos. La longitud de la rejilla depende del espesor del estrato granular; el tamaño de las aberturas de las ranuras queda definido por la gradación de la arena. En gran medida, son las características naturales del acuífero las que establecen estas dimensiones, dejando al diámetro como un factor que puede variarse.

Las pruebas de laboratorio y la experiencia de campo demuestran que si la velocidad de entrada del agua a través de la rejilla es de un valor igual o menor a 3 centímetros por segundo, se obtendrán los siguientes resultados:

- Las pérdidas por fricción en las aberturas de la rejilla serán de un valor despreciable.
- La velocidad de incrustación será mínima.
- La velocidad de corrosión será también mínima.

La velocidad de acceso se calcula dividiendo la descarga deseada o que se espera obtener; por el área total abierta de las ranuras de la rejilla. Si la cifra que se obtiene es mayor que 3 cm/s., se deberá aumentar el diámetro de la rejilla de modo que se provea suficiente área abierta y la velocidad se aproxime al valor indicado.

Por otra parte, si la velocidad así calculada resulta ser menor que el valor mencionado, sea por ejemplo 1.5 cm/s., se podrá entonces reducir el diámetro de la rejilla en cierta proporción. Aquella rejilla que contenga una mayor área abierta, tiene gran ventaja en cuanto a su costo, al comparársela con diferentes tipos de rejilla que produzcan la misma velocidad de entrada. El diámetro de la rejilla deberá ser tan grande como se pueda, para así mantener el valor de la velocidad de entrada definitivamente por debajo del valor límite de 3 cm/s.

Los postulados anteriores suponen que la bomba se colocará por sobre la rejilla, que es el caso usual y que las pérdidas de carga relacionadas con el flujo vertical ascendente del agua a través de la rejilla son pequeñas, lo que por lo general también es cierto.

La mayor parte de los fabricantes de rejillas suministran tablas que indican el área abierta por metro para cada tamaño de ésta y

para diversos anchos de ranuras. La Tabla XXV es un ejemplo de lo anterior.

Capacidad Transmisora de la Rejilla

La capacidad transmisora de una rejilla de pozo, expresada por ejemplo en litros por segundo por cada metro de rejilla y a la velocidad recomendada de entrada de 3 cm/s., se calcula fácilmente mediante los valores mostrados en la tabla. Al multiplicar el número de pulgadas cuadradas de abertura, tal como se muestra en la Tabla XXV, por un factor de 0.31, se obtiene la capacidad de transmisión de la rejilla, en las unidades de la Tabla.

Por ejemplo, el área abierta de una Rejilla Johnson para pozo, de 8 pulgadas de diámetro y de aberturas de tamaño No. 60 (0.60 pulgadas) (1.524 mm) es, según la Tabla, de 113 pulgadas cuadradas por cada pie lineal de rejilla, por lo que la capacidad transmisora será de 0.31 x 113, o sea, de 35 galones por minuto por pie de rejilla (0.434 metros cúbicos por minuto por metro de rejilla). Tres metros de esta rejilla, a la velocidad estipulada de 3 cm/s., transmitirán 1.30 m³/min/m. de agua a través de las aberturas de la misma. Debe tenerse en cuenta que la capacidad de transmisión de una rejilla de pozo es una característica hidráulica de la rejilla en sí, a la velocidad recomendada de acceso y en ningún momento constituye una medida del rendimiento del acuífero en el cual se halla instalada.

La Fig. 145 es un ejemplo de cómo el uso de una rejilla con gran cantidad de área abierta, permite escoger para ésta, un diámetro algo menor que el del ademe. Este

Tabla XXV
Areas Abiertas de Rejillas Johnson del Tipo Telescópico

Diámetro de la Rejilla en Pulgadas	Area de Captación por Pie Lineal de Rejilla en Pulgadas Cuadradas						
	Abertura No. 10	Abertura No. 20	Abertura No. 40	Abertura No. 60	Abertura No. 80	Abertura No. 100	Abertura No. 150
3"	10	19	32	42	43	55	65
4"	14	26	44	57	58	74	88
5"	18	33	55	72	73	94	112
6"	21	39	65	85	87	111	132
8"	28	51	87	113	116	131	160
10"	36	65	110	143	147	166	203
12"	42	77	130	170	174	180	223
14" OD	38	71	123	163	177	198	251
15" OD	39	76	132	175	190	217	268
16" OD	35	69	123	164	171	198	250
18" OD	39	78	139	186	193	224	283
20" OD	47	88	156	209	218	252	318
24" OD	46	87	158	217	266	307	389
26" OD	49	91	166	227	278	321	406
30" OD	57	108	192	268	239	379	480
36" OD	65	124	224	307	376	434	550

Nota: Cada rejilla se designa por el tamaño de la tubería de acero a través de la cual deberá insertarse por el método telescópico. El número de ranura denota el ancho de la abertura en milésimas de pulgada. En algunos casos especiales, las áreas abiertas podrían diferir un poco de los valores mostrados. Un pie lineal = 0.305 m. Una pulgada = 2.54 cm. Una pulgada cuadrada = 6.45 cm². OD = diámetro exterior.

Tabla XXIV
Tabla de Diseño para Escoger las Aberturas

Protundidad m.	Espesor m.	Tamaño Efectivo mm.	Cuadrado del tamaño efectivo mm ·	Aberturas Posibles de Rejilla mm. 40% de		
				Mínima	Retención	Máxima
30 a 35	4.6	0.254	0.065	0.71	0.76	0.76
35 a 38	3.	0.660	0.436	1.73	2.03	2.41

reducirán grandemente las posibilidades de invasión de arena al bombear el pozo.

Diámetro de la Rejilla

En los análisis de la hidráulica de pozos del Capítulo 6, hemos visto que el diámetro del intervalo de captación de un pozo puede variar sin que ello afecte grandemente su capacidad específica. Al duplicar el diámetro de ese intervalo, o sea, la rejilla, la capacidad especifica aumentará escasamente en un 10 por ciento, si los otros factores permanecen inalterados.

El diámetro de la rejilla se escoje con miras a cumplir con un principio básico y que consiste en que se debe proveer suficiente área de entrada para que la velocidad de acceso del agua al pozo no exceda de un cierto valor estipulado. El diámetro de la rejilla constituye un factor que podría variarse una vez que la longitud y el tamaño de las aberturas hayan sido escogidos. La longitud de la rejilla depende del espesor del estrato granular: el tamaño de las aberturas de las ranuras queda definido por la gradación de la arena. En gran medida, son las características naturales del acuífero las que establecen estas dimensiones, dejando al diámetro como un factor que puede variarse.

Las pruebas de laboratorio y la experiencia de campo demuestran que si la velocidad de entrada del agua a través de la rejilla es de un valor igual o menor a 3 centímetros por segundo, se obtendrán los siguientes resultados:

- Las pérdidas por fricción en las aberturas de la rejilla serán de un valor despreciable.
- La velocidad de incrustación será mínima.
- La velocidad de corrosión será también mínima.

La velocidad de acceso se calcula dividiendo la descarga deseada o que se espera obtener, por el área total abierta de las ranuras de la rejilla. Si la cifra que se obtiene es mayor que 3 cm/s., se deberá aumentar el diámetro de la rejilla de modo que se provea suficiente área abierta y la velocidad se aproxime al valor indicado.

Por otra parte, si la velocidad así calculada resulta ser menor que el valor mencionado, sea por ejemplo 1.5 cm/s., se podrá entonces reducir el diámetro de la rejilla en cierta proporción. Aquella rejilla que contenga una mayor área abierta, tiene gran ventaja en cuanto a su costo, al comparársela con diferentes tipos de rejilla que produzcan la misma velocidad de entrada. El diámetro de la rejilla deberá ser tan grande como se pueda, para así mantener el valor de la velocidad de entrada definitivamente por debajo del valor límite de 3 cm/s.

Los postulados anteriores suponen que la bomba se colocará por sobre la rejilla, que es el caso usual y que las pérdidas de carga relacionadas con el flujo vertical ascendente del agua a través de la rejilla son pequeñas, lo que por lo general también es cierto.

La mayor parte de los fabricantes de rejillas suministran tablas que indican el área abierta por metro para cada tamaño de ésta y

para diversos anchos de ranuras. La Tabla XXV es un ejemplo de lo anterior.

Capacidad Transmisora de la Rejilla

La capacidad transmisora de una rejilla de pozo, expresada por ejemplo en litros por segundo por cada metro de rejilla y a la velocidad recomendada de entrada de 3 cm/s., se calcula fácilmente mediante los valores mostrados en la tabla. Al multiplicar el número de pulgadas cuadradas de abertura, tal como se muestra en la Tabla XXV, por un factor de 0.31, se obtiene la capacidad de transmisión de la rejilla, en las unidades de la Tabla.

Por ejemplo, el área abierta de una Rejilla Johnson para pozo, de 8 pulgadas de diámetro y de aberturas de tamaño No. 60 (0.60 pulgadas) (1.524 mm) es, según la Tabla, de 113 pulgadas cuadradas por cada pie lineal de rejilla, por lo que la capacidad transmisora será de 0.31 x 113, o sea, de 35 galones por minuto por pie de rejilla (0.434 metros cúbicos por minuto por metro de rejilla). Tres metros de esta rejilla, a la velocidad estipulada de 3 cm/s., transmitirán 1.30 m^3/min/m. de agua a través de las aberturas de la misma. Debe tenerse en cuenta que la capacidad de transmisión de una rejilla de pozo es una característica hidráulica de la rejilla en sí, a la velocidad recomendada de acceso y en ningún momento constituye una medida del rendimiento del acuífero en el cual se halla instalada.

La Fig. 145 es un ejemplo de cómo el uso de una rejilla con gran cantidad de área abierta, permite escoger para ésta, un diámetro algo menor que el del ademe. Este

Tabla XXV
Areas Abiertas de Rejillas Johnson del Tipo Telescópico

Diámetro de la Rejilla en Pulgadas	Area de Captación por Pie Líneal de Rejilla en Pulgadas Cuadradas						
	Abertura No. 10	Abertura No. 20	Abertura No. 40	Abertura No. 60	Abertura No. 80	Abertura No. 100	Abertura No. 150
3"	10	19	32	42	43	55	65
4"	14	26	44	57	58	74	88
5"	18	33	55	72	73	94	112
6"	21	39	65	85	87	111	132
8"	28	51	87	113	116	131	160
10"	36	65	110	143	147	166	203
12"	42	77	130	170	174	180	223
14" OD	38	71	123	163	177	198	251
15" OD	39	76	132	175	190	217	268
16" OD	35	69	123	164	171	198	250
18" OD	39	78	139	186	193	224	283
20" OD	47	88	156	209	218	252	318
24" OD	46	87	158	217	266	307	389
26" OD	49	91	166	227	278	321	406
30" OD	57	108	192	268	239	379	480
36" OD	65	124	224	307	376	434	550

Nota: Cada rejilla se designa por el tamaño de la tubería de acero a través de la cual deberá insertarse por el método telescópico. El número de ranura denota el ancho de la abertura en milésimas de pulgada. En algunos casos especiales, las áreas abiertas podrían diferir un poco de los valores mostrados. Un pie lineal = 0.305 m. Una pulgada = 2.54 cm. Una pulgada cuadrada = 6.45 cm^2. OD = diámetro exterior.

pozo intercepta una a rena y grava acuíferas de la formación Chicot. en Louisiana del Sur. A la producción esperada de 409 m^3h.. o más, se requeriría el uso de un diámetro exterior de ademe de 20 pulgadas (51 centímetros). Sin embargo, una rejilla de 12 pulgadas, fabricada al tamaño de la tubería, estaría en capacidad de suministrar suficiente área abierta, de modo que la velocidad de entrada no excedería de 3 cm/s.. aún en el caso de tener que bombear del pozo 681 m^3/hora.

Cuando se hace necesario colocar la bomba dentro de la rejilla, o dentro de un tramo de tubo que esté conectado a dos tramos de rejilla, se deberá escoger de la Tabla XXIII el diámetro de rejilla correspondiente a la más profunda ubicación prevista de la bomba. Sin embargo, cualquier tramo subsiguiente de rejilla por debajo de la posición de la bomba, podría ser de menor diámetro siempre que se ajuste a las condiciones estipuladas de entrada. La Fig. 151 constituye un ejemplo de este tipo de diseño. Una rejilla de 12.5 cm. de diámetro, colocada en la parte superior de la formación, podría acomodar a una bomba de motor sumergido de unos 190 litros por minuto. Por debajo de la posición prevista más profunda de la bomba, el diámetro de la rejilla ha sido reducido a 5 centímetros en toda la extensión de los 18 metros inferiores de la formación. En este caso particular el pozo había sido perforado con el mismo diámetro en toda su profundidad. La parte inferior, en la cual se instaló la rejilla de 5 centímetros, se diseñó para alojar un filtro artificial de grava y el intervalo de captación correspondiente a la rejilla de 12.5 cm. se completó mediante el proceso de desarrollo natural.

Selección del Material

Hay tres aspectos que gobiernan la elección del metal con el cual se va a fabricar la rejilla. Estos son los siguientes:

- Contenido mineral del agua.
- Presencia de jaleas bacterianas.
- Requisitos de resistencia de la rejilla.

El contenido mineral del agua subterranea se obtiene mediante un análisis químico. El estudio de los análisis revela, por lo general, si el agua del subsuelo es corrosiva o incrustante. En algunos casos el agua puede causar tanta corrosión como incrustación.

Agua Corrosiva

La corrosión de la rejilla causa con más frecuencia la falla o deterioro del pozo que la corrosión del ademe. Al agrandarse las aberturas de la rejilla por la corrosión de sólo unas pequeña fracción del metal, podría ocurrir la invasión de una excesiva cantidad de arena al pozo. Por otra parte, la corrosión podría eliminar unos cuantos milímetros de la pared del ademe y, sin embargo, permitir que el espesor que quedara evite el colapso del pozo o la entrada de agua de calidad no apetecible. Por lo tanto, es de mucha importancia usar rejilla que haya sido construída con un metal resistente a la corrosión.

La lista siguiente de índices de corrosividad del agua puede ser útil al diseñador que desea descubrir las condiciones potenciales de corrosividad de ésta.

1. Valor bajo del pH Si este es menor que 7.0, el agua es ácida y existen condiciones de corrosividad.
2. Oxígeno disuelto. Si éste excede de 2 ppm. al agua es corrosiva. El oxígeno disuelto se encuentra de preferencia en los pozos freáticos someros. Resulta difícil determinar con precisión el oxígeno disuelto.
3. Sulfuro de hidrógeno. Su presencia puede establecerse fácilmente por su característico olor a huevos podridos. Las concentraciones menores de 1 ppm pueden causar una corrosión severa y esta cantidad se percibe fácilmente por el olfato o el gusto.
4. Sólidos disueltos totales. Si el contenido mineral disuelto excede de 1,000 ppm, la conductividad eléctrica del agua es suficientemente alta como para causar corrosión electrolítica. Para evitar esto, se necesitan rejillas fabricadas de un solo metal, resistente a la corrosión.
5. Dióxido de carbono. Si la presencia de este gas excede de 50 ppm, el agua es corrosiva.
6. Cloruros. Si el contenido de cloruros en el agua sobrepasa las 500 ppm, la corrosión es de esperarse.

Cuando se presentan combinaciones de cualquiera de estos agentes corrosivos, el efecto aumenta y cualquier conjunto de dos de ellos por lo general produce mayor corrosión que uno cualquiera por sí solo.

Agua Incrustante

El agua que ostenta esta característica tiene la tendencia a depositar minerales en la superficie de la rejilla y en los poros de la formación cercanos a ésta. Tales deposiciones obstruyen las aberturas de la rejilla y de la formación. Algunos índices de incrustabilidad del agua son los siguientes:

1. Alto valor del pH. Si este se halla por encima de 7.5, es de esperarse que el agua manifieste tendencias incrustantes.
2. Dureza de carbonatos. Si ésta excede de 300 ppm, tendrá lugar la incrustación por la deposición de carbonato de calcio (costras de cal).
3. Hierro. Si su contenido sobrepasa las 2.00 ppm, tiene lugar la incrustación por la precipitación del hierro.
4. Manganeso. Si su contenido en el agua excede de 1.0 ppm, con la simultánea presencia de un alto pH, la incrustación debida a la precipitación del manganeso es segura, si hay oxígeno presente.

Los depósitos minerales provenientes del agua subterránea del tipo incrustante, son a menudo removidos mediante la adición al agua contenida en el pozo, de una fuerte concentración de ácido muriático (ácido clorhídrico), que los disuelve. Las rejillas de pozo que se utilicen en estos tipos de agua deberán estar construídas con metales resistentes que soporten la acción corrosiva del tratamiento con ácido. Tanto el tipo Everdur como el de acero inoxidable 304, de rejilla de pozo, han resistido con éxito este tipo de tratamiento.

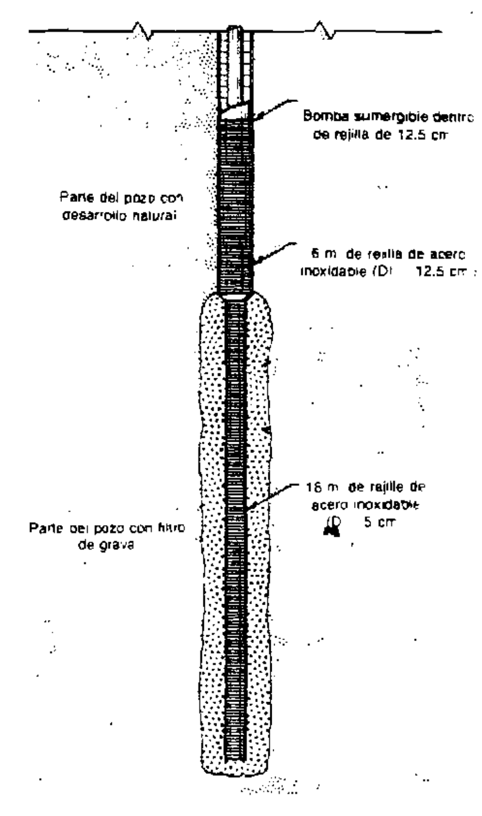


Fig. 151: Pueden combinarse dos tamaños diferentes de rejilla cuando sea necesario ajustarse a condiciones especiales, como en este ejemplo nada común.

La bacteria, comúnmente denominada bacteria ferrosa o ferruginosa, se encuentra presente en algunas aguas subterráneas. Esta no es ofensiva a la salud. La bacteria ferrosa es un organismo molesto que causa la obstrucción de los poros de la formación acuífera y de las aberturas de una rejilla. Estas bacterias producen un material pegajoso y de una consistencia de jalea viscosa y causan la oxidación y precipitación de hierro disuelto y de manganeso. Debido al efecto combinado de la proliferación de los organismos y de los minerales precipitados, en un corto tiempo se produce la obstrucción casi completa del pozo. Se han reportado casos en los cuales se ha

manifestado una reducción de casi el 75 por ciento en el rendimiento del pozo, en sólo tres meses o un año.

Un tratamiento efectivo cuando se presenta esta condición, consiste en el uso de una solución relativamente fuerte de cloro, la cual destruye los organismos. A menudo se utiliza el tratamiento con ácido clorhídrico después de la aplicación de cloro, para disolver las precipitaciones de hierro y manganeso, haciendo así posible eliminarlos por bombeo, de la zona que rodea al pozo. La corrosividad de las fuertes soluciones de cloro, además de que el tratamiento debe repetirse periódicamente, hace indispensable que las rejillas que se empleen se hayan fabricado con metales resistentes a éstos tratamientos químicos. Lo anterior obliga a escoger un metal adecuado.

Resistencia de la Rejilla

La elección del metal de la rejilla queda muchas veces condicionada a la resistencia de aquélla. Los dos fuerzas impuestas a la rejilla que se consideran más importantes, son la carga de columna y la presión que le haría sufrir un colapso. Cuando una rejilla larga soporta un peso considerable de tubo por encima de ella, la rejilla actúa como una columna esbelta. Cuando la presión de los materiales y el socavamiento de éstos aplastan a la rejilla, ésta debe disponer de adecuada resistencia para soportarlo.

La resistencia de la rejilla a ambas fuerzas es directamente proporcional al módulo de elasticidad del material empleado en su fabricación. Se deduce de lo anterior que si la rejilla se hace de acero inoxidable cuyo módulo de elasticidad es de 210 toneladas métricas por centímetro cuadrado, tiene el doble de la resistencia de otra que haya sido fabricada de alguna aleación de cobre cuyo módulo de elasticidad es de 150 toneladas métricas por centímetro cuadrado, teniendo ambas las mismas características estructurales de sus miembros verticales y horizontales.

Cuando se consideran solamente los requisitos estructurales de resistencia, una rejilla debe fabricarse de acero inoxidable en lugar de bronce Everdur. En aquellos casos en que la calidad del agua es tal que se prefiere el bronce Everdur, los requisitos de resistencia pueden satisfacerse, si así se necesita, utilizando mayor número o tamaño de miembros verticales para lograr una mayor resistencia de columna y elementos horizontales más gruesos para obtener una mayor resistencia al colapso.

No es buena práctica sobrediseñar y proveer resistencia excesiva innecesaria, puesto que ello reduce el área abierta de la rejilla. El propósito de ésta es el de permitir al agua que entre al pozo con la menor pérdida posible de fricción. La rejilla debe tener resistencia adecuada para soportar las fuerzas a las cuales va a estar sometida y la máxima área abierta posible sin que esa resistencia se vea en ningún momento afectada.

Las rejillas de pozo se fabrican en diversas clases de metal. La Tabla XXVI suministra una guía para escoger éste y en ella se indica también el costo relativo y la resistencia a la corrosión.

Diseño de Filtros de Grava

El pozo construído con un filtro artificial de grava difiere del que se ha desarrollado en forma natural, en que la zona immediata al pozo y que rodea a éste, se ha hecho más permeable por la remoción del material de la formación y su sustitución por un material más grueso, artificialmente gradado. En el pozo naturalmente desarrollado, el material fino de la formación que rodea a la rejilla se elimina mediante el desarrollo, creando así una zona más permeable. En cualquiera de los dos casos el resultado neto, desde el punto de vista hidráulico, es el de un aumento del diámetro efectivo del pozo.

En los pozos que han sido desarrollados en forma natural, se ha demostrado que la abertura de las ranuras de la rejilla se pueden

Tabla XXVI
Metales de las Rejillas de Pozo y sus Aplicaciones

Metal Aleación	Composición Nominal	Costo Relativo	Aplicaciones Sugeridas
MONEL	70% niquel 30% cobre	1.5	Alto cloruro de sodio combinado con oxigeno disuelto, como en el agua del mar. No se necesita por lo general agua subterránea potable.
ACERO INOXIDABLE	74% acero 18% cromo 8% niquel	1.0	Sulfuro de hidrógeno. Oxigeno disuelto. Dióxido de carbono. Bacteria ferrosa. Excelente resistencia.
EVERDUR	96% cobre 3% sílice 1% manganeso	1.0	Alta dureza total. Alto cloruro de sodio en ausencia de oxígeno disuelto. Alto contenido de hierro. Extremadamente resistente a los tratamientos con ácido.
BRONCE ROJO AL SILICIO	83% cobre 16% zinc 1% sílice	0.9	Usado para las misma condiciones que el Everdur, pero inferior y no tan resistente. Se utiliza en aguas no muy activas.
HIERRO ARMCO	99.84% hierro puro (doblemente galvanizado).	0.6	No es resistente a la corrosión, pero actúa satisfactoriamente en ciertas áreas. Se utiliza en pozos para riego, en donde las aguas son relativamente neutras.
ACERO	99.35/99.72 hierro 0.09/0.15 carbono 0.20/0.50 manganeso (doble galvanización.)	0.5	No es resistente a la corrosión. Por lo general se usa en pozos no permanentes, tales como los de prueba, o pozos para desecación. En algunos lugares de Estados Unidos alcanza una vida útil satisfactoria, especialmente si las aguas no son corrosivas ni incrustantes.

escoger de modo que retengan alrededor del 40 por ciento del material de la formación natural y que dejen pasar un 60 por ciento del mismo, a través de las aberturas, durante el proceso de desarrollo. En el pozo dotado de un filtro artificial la grava artificialmente gradada se escoge de modo que ésta retenga prácticamente todo el material de la formación; la rejilla que luego se elije debe tener un tamaño tal que a su vez retenga la grava.

El pozo construído con un filtro artificial de grava cuesta por lo general más que el que se desarrolla naturalmente, pero en algunos casos, la construcción del filtro resulta más económica. Ciertas condiciones geológicas inducen al uso del filtro artificial de grava y en estos casos resulta imperativo usar este tipo de diseño, no importa su costo.

Hay ciertas condiciones que tienden a ir en favor de la construcción con filtro artificial de grava. Algunas de éstas se discuten en los párrafos que siguen a continuación.

Arena Fina Uniforme. En este tipo de formación, debe considerarse el uso de un filtro de grava, puesto que así puede utilizarse un tamaño mayor de abertura en las ranuras de la rejilla. Consecuentemente, el área abierta de la misma, resultará mayor. La característica de las rejillas de pequeño tamaño de aberturas es la de una área abierta

menor. Si la abertura de ranura que se seleccione en el caso de un pozo con desarrollo natural, es menor que 0.010 de pulgada (ranura No. 10) (0.254 mm), debe considerarse la alternativa de utilizar un filtro de grava. Es posible aceptar cierta desviación de este límite, dependiendo del contenido mineral del agua.

Algunos ejemplos incluyen la formación Eutaw, en Alabama, la arena de Raritan en New Jersey, la arena de Sparta en Louisiana y los acuíferos de las llanuras del Indus, en Pakistán Occidental.

Si el agua es extremadamente incrustante, se puede usar un límite de 0.015 ó 0.020 pulgadas (0.38 ó 0.51 mm). Por otra parte, en algunas áreas tales como las Planicies Costeras del Golfo en el sur de los Estados Unidos, existen pozos naturalmente desarrollados que utilizan rejillas cuyas aberturas son tan pequeñas como 0.006 pulgadas (0.15 mm) sólo porque la experiencia ha demostrado que éste es el mejor tipo de diseño.

Acuífero Artesiano de Gran Espesor. En este tipo de acuífero en el que se requiere una gran longitud de rejilla y en el cual la bomba ha de colocarse por sobre el intervalo enrejillado del pozo, se puede situar centrándola en el agujero, una rejilla de menor diámetro y el espacio anular llenarse con grava. Lo anterior es preferible a usar una rejilla más corta de un diámetro parecido al del agujero.

Arenisca Cementada sin Cohesión. Muchos excelentes acuíferos de arenisca se hallan pobremente cementados. Como ejemplos de esta condición, se pueden citar la arenisca de Dakota en Dakota del Norte y del Sur, la arenisca de Jordan en Minnesota y las areniscas de Garber y Elk City en Oklahoma. Si un pozo se construye, dejando abierto el agujero dentro de estos acuíferos, se desprenden de las paredes algunas partículas de lo que da por resultado un pozo que arroja arena.

Puesto que la mayor parte de las areniscas son de granulometría fina, puede que se necesite usar rejillas con aberturas de 0.005 pulgadas (0.127 mm) o aún menores, para enfrentarlas a esas formaciones en aquellos pozos desarrollados naturalmente (con base en un 50 por ciento de retención). En tales formaciones, por lo tanto, el mejor diseño consiste en proveer un filtro de grava artificial o una envoltura de arena de modo que se puedan usar mayores aberturas de rejilla.

Otra de las razones para dotar de filtro artificial de grava a un pozo perforado en un acuífero de arenisca, es la de que el material de la formación casi no ofrece apoyo lateral a

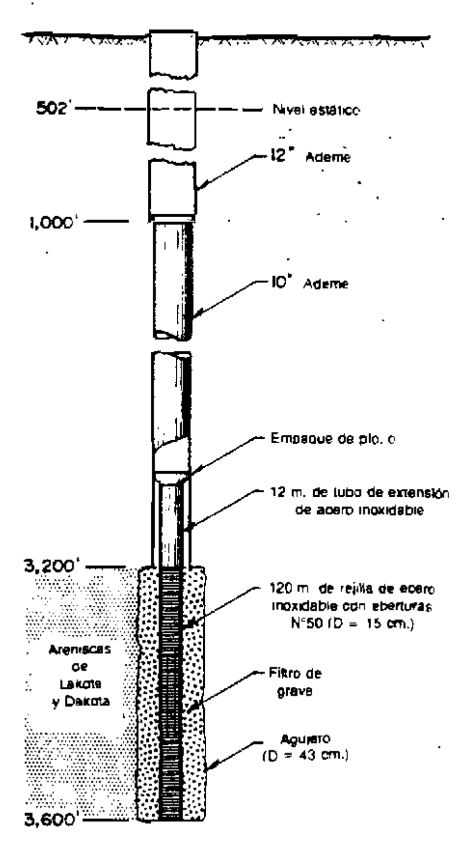


Fig. 152: Por lo general se prefiere dotar a un pozo de un filtro de grava, cuanto éste se perfora en acuíferos tales como las formaciones Dakota y Lakota, en Dakota del Sur.

la rejilla. Durante el proceso de desarrollo, la formación no se adhiere ni se recuesta a la rejilla, como sucede en las formaciones no consolidadas. Una vez colocada la rejilla en el agujero, algunos espacios vacíos permanecen en el anillo comprendido entre la rejilla y la pared del agujero. Esto deja abierta la posibilidad de que una sección de la formación pueda derrumbarse y caer sobre la rejilla en cualquier momento, dañándola. El material suelto y granular embebido entre la rejilla y la pared del agujero se acomoda en todas las irregularidades de éste. En esta forma, soporta a las paredes del agujero y al mismo tiempo brinda apoyo lateral a la rejilla. La Fig. 152 muestra los detalles constructivos de un pozo dotado de filtro de grava y construido en las areniscas de Dakota y Lakota. La arenisca de Dakota constituye un excelente acuífero en diversos estados del Medio Oeste, pero se encuentra pobremente cementada; por lo tanto, aquellos pozos que se terminen como agujeros libres, arrojarán arena al bombearlos.

Formaciones Extensamente Laminadas. Algunos acuíferos consisten de capas alternas de material fino, mediano y grueso. Ejemplos de estos son las formaciones Magothy en Long Island, New York, algunos depósitos de las planicies costeras de Carolina del Norte, la formación Ogallala de la Región de las Altiplanicies y algunos acuíferos de Turquía y de Chile. A menudo resulta difícil determinar con precisión la posición y el espesor de cada estrato individual y escoger la longitud apropiada de cada intervalo de rejilla de aberturas múltiples correspondiente a cada estratificación. Por lo general, resulta mejor en un caso tal, reducir la posibilidad de cometer un error, diseñando el pozo con un filtro artificial de grava.

La gradación del filtro de grava debe regirse por el estrato más fino de material en el intervalo productor. Un filtro de grava que se escoja con este criterio, no va a limitar el flujo proveniente de los estratos de material más grueso, puesto que la permeabilidad del filtro será de varias veces la permeabilidad de éste. Puesto que el filtro de grava artificialmente gradada es más uniforme y limpio que el estrato más grueso del acuífero, el resultado que se obtiene es el de una mayor permeabilidad.

Factores de Costo

Ya se ha dicho que, por lo general, el pozo dotado de un filtro artificial de grava es más costoso que el pozo desarrollado en forma natural. Dos razones corroboran lo anterior.

- El tamaño mayor de agujero que se necesita para instalar un filtro artificial de grava, cuesta más por metro;
- Debe adquirirse y transportarse hasta el sitio de la obra, grava que ha de ser especialmente gradada.

Cuando se perfora con herramientas de percusión, la segunda razón resulta especialmente válida, puesto que al duplicar el diámetro del pozo, casi se duplica también su costo de perforación. En la perforación convencional por rotación, en general también cuesta más perforar un agujero de mayor diámetro, puesto que se necesita usar fluídos de perforar que han de ser más viscosos y densos y se deben mantener mayores razones de circulación del fluído, con el objeto de arrastrar los fragmentos hasta la superficie del terreno a través de un agujero que tiene una sección transversal de gran superficie.

Por otra parte, si se emplea equipo de circulación inversa, el aumento en el diámetro del agujero no tiene mayor importancia. Por lo general, el perforar un agujero de 90 centímetros cuesta casi lo mismo que perforar uno de 60 centímetros. Los factores principales del costo extra, serían un mayor barreno, un foso de lodo más extenso y más cantidad de grava. Resulta, pues, más económico en ciertos casos construir un pozo con filtro artificial

de grava por este método ya que la economía en tiempo de desarrollo puede contrarrestar el costo inicial extra. Esto es especialmente cierto en los depósitos aluviales y terrazas fluviales como las que se encuentran en Oklahoma, Kansas y Nebraska.

Diseño del Filtro de Grava

Los pasos lógicos que se requiere seguir en el diseño de un filtro artificial de grava, son los siguientes:

1. Deben construirse las curvas granulométricas de todos los estratos que componen el acuífero. Se determina el estrato formado por la arena más fina y se escoge la gradación del filtro con base en el análisis granulométrico de este material. La Fig. 153 muestra la gradación de dos muestras de un material acuífero característico que constituye un acuífero de 9 metros de espesor. El material más fino se halla situado entre los 22.5 y los 27 metros de profundidad. En este ejemplo, el diseño del filtro de grava se basará en la granulometría de este estrato. (Algunas veces constituye una buena práctica el desechar aquellos intervalos desfavorables del acuífero y utilizar tubo ciego en aquellos tramos comprendidos entre las secciones de rejilla que se hayan colocado frente a las mejores partes del acuífero).

2. Debe multiplicarse el tamaño de arena correspondiente al 70 por ciento de retención, por un factor que va desde 4 hasta 6.* Usese un factor de 4 como multiplicador, si la formación es fina y uniforme; úsese 6, si ésta es más gruesa y no uniforme. Una vez hecho esto, sitúese el resultado numérico de esta multiplicación en el gráfico sobre la línea horizontal correspondiente al 70 por ciento de retención de la grava. En la Fig. 153, 0.005 de pulgada (0.127 mm) es el tamaño que corresponde al 70 por ciento de retención de la arena del intervalo entre 22.5 y 27 metros de profundidad. Si se usa 5 como factor de multiplicación, tendremos que 5 x 0.005 = 0.025 pulgadas (0.635 mm) que será el tamaño correspondiente al 78 por ciento de retención de la grava. Este punto constituye el primero de la curva que va a representar la gradación del material del filtro artificial de grava

3. A través del punto inicial de la curva del filtro de grava, debe dibujarse una curva suave que represente a un material cuyo coeficiente de uniformidad sea de 2.5 o menos. Este paso debe efectuarse por tanteos. En la Fig. 153, la curva que aparece como línea llena tiene un coeficiente de uniformidad de alrededor de 1.75. Esta curva bien podría haberse trazado en forma algo diferente, como lo indica la línea interrumpida, la cual tiene un coeficiente de uniformidad de 2.47. Es más aconsejable trazar la curva del filtro de grava de modo que resulte tan uniforme como sea posible (bajo coeficiente de uniformidad). Por lo tanto, el material indicado por la curva de línea llena es preferible al indicado por la curva de línea interrumpida.

4. Prepárense a continuación las especificaciones del material del filtro de grava, escogiendo primero unos 4 ó 5 tamaños de criba que abarquen la amplitud de la curva y luego establézcase un rango permisible del porcentaje retenido en cada una de las cribas escogidas. Este rango permisible puede ser de unos 8 puntos de porcentaje por encima y por debajo del porcentaje de retención dado por cualquier punto de la curva. En nuestro ejemplo, la criba de mayor numeración debería corresponder a una abertura de 0.065 pulgadas (1.65 mm). La curva indica un cero por ciento de retención para esta criba, de modo pues, que un 8 por ciento viene a ser el máximo permitido en la especificación, para este tamaño de grano. El siguiente tamaño menor de abertura, que sigue en la serie más común de cribas, es de 0.046 pulgadas (1.17 mm). La curva, tal como se encuentra trazada, muestra que el 18 por ciento sería retenido en esta criba; para obtener entonces el rango permisible, se suma y se resta un 8 por ciento. De esta manera, para el caso de la criba de 0.046 pulgadas (1.17 mm), el rango varía entre 10 por ciento y 26 por ciento. El procedimiento se repite hasta que a cada criba previamente escogida se le ha asignado un rango permisible.

*Usese un factor comprendido entre 6 y 9, cuando la arena de la formación tiene una gradación altamente no uniforme e incluye limo, tal como corrientemente sucede en parte de los estados occidentales de los Estados Unidos y en otras regiones áridas o semi-áridas del mundo

En la Fig. 153 se muestran cinco tamaños de abertura de criba que cubren la gradación que se desea del material del filtro. Dándole a la persona que suministra la grava un rango aceptable para cada uno de estos puntos, resulta posible para aquélla producir el material que se requiere, a un costo razonable. Al diseñar material para filtros de grava, el diseñador debe tener en cuenta las fuentes locales de abastecimiento de arena filtrante, usada en filtros rápidos de tratamiento de agua. Las firmas que producen estos materiales mantienen grandes existencias de arenas limpias y uniformemente gradadas y gravas que fácilmente se ajustan a los requisitos de los filtros artificiales de grava para pozos.

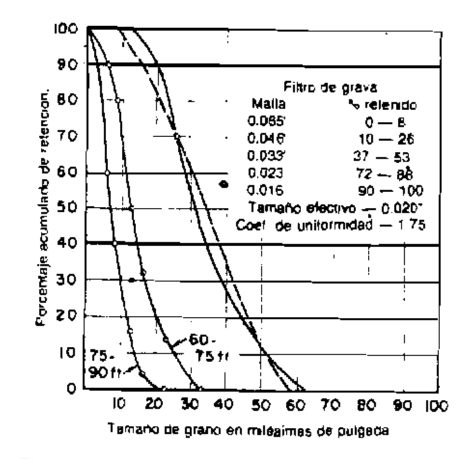


Fig. 153: Curvas granulométricas de arena acuífera y curva correspondiente al material adecuadamente seleccionado del filtro de grava.

5. Como último paso, selecciónese un tamaño de abertura de rejilla que sea capaz de retener un 90 por ciento o más, del material del filtro. En nuestro ejemplo, el tamaño correcto de la abertura de ranura, sería de 0.020 pulgadas (0.508 mm).

Si el diseñador del pozo sigue cuidadosamente los pasos anteriores, podrá evitar que los pozos arrojen arena, ya que el diseño se basa en una relación apropiada entre el tamaño de grano de la formación y el del filtro de grava. Un filtro que tenga tal relación de tamaños al compararlo con la formación, proveerá una retención mecánica de ésta y evitará que la arena se desplace hacia la envoltura de grava y hacia el pozo mismo.

Los materiales del filtro de grava deberán estar limpios y contener granos bien redondeados que sean lisos y uniformes. Estas características aumentan la permeabilidad y la porosidad del material del filtro. En un material uniforme tiene lugar una menor separación hidráulica de las partículas, cuando éste se está colocando o dejando que se asiente a una profundidad considerable dentro del agua.

Los materiales para filtro consistentes en su mayor parte de partículas silíceas más que calcáreas son preferibles. El límite permisible de contenido de materiales calcáreos, es de un 5 por ciento. Esto es importante por la posibilidad de que el pozo necesite más adelante algún tratamiento con ácido. La mayor parte del ácido se desperdiciaría en disolver las partículas calcáreas, más que en eliminar las deposiciones incrustrantes de calcio o de hierro. Son también inconvenientes aquellas partículas de lutita y de anhidrita y yeso.

Espesor del Filtro de Grava

Puesto que la teoría de diseño de la gradación de los filtros de grava se basa en

la retención mecánica de las partículas de la formación, lo único que se necesitaría es un espesor de filtro de solamente dos o tres tamaños de grano, para que el filtro retuviese y controlase la arena de la formación. Las pruebas de laboratorio realizadas por Edward E. Johnson Inc., demuestran que un filtro con un espesor de solamente una fracción de centímetro, retiene con éxito las partículas de la formación, no importa cuál sea la velocidad del agua que tiende a arrastrar dichas partículas hacia el filtro. Sin embargo, se reconoce que no resulta práctico colocar en un pozo un filtro de grava cuyo espesor sea de solamente una fracción de centímetro y esperar que, en esta forma, la envoltura alrededor de la rejilla sea completa. Para asegurarse de que toda la envoltura de grava rodee a la rejilla, se necesita, por lo tanto, un espesor de unos 8 centímetros, que se considera práctico para su instalación en sitio.

En la mayoría de los casos el límite máximo para el espesor de un filtro de grava debe ser de unos 20 centímetros. Una envoltura de mayor espesor no aumenta en grado apreciable el rendimiento del pozo, y el espesor, en sí mismo, no hace nada para reducir la posibilidad de invasión de arena, ya que el factor regulador es la relación entre el tamaño del grano del material del filtro y el del material de la formación. Si el espesor del filtro de grava es muy grande, el desarrollo final del pozo puede resultar sumamente difícil, tal como se explica más adelante en el Capítulo 14.

Se ha invocado que una de las ventajas del filtro de grava que se coloca en un pozo consiste en la habilidad del material del filtro para funcionar como conducto vertical. Algunas personas sugieren que el agua proveniente de la parte superior del acuífero puede percolar fácilmente en forma vertical a través de la grava y penetrar a la rejilla. Se arguye que ello haría posible el enrejillar únicamente la parte inferior del acuífero.

La Fig. 154 ilustra un ejemplo que demuestra que la ascerción anterior es una falacia. En la condición mostrada, la cantidad aproximada de agua que podría desplazarse verticalmentehacia abajo y desde el acuífero superior hacia la rejilla del pozo, se puede calcular de la siguiente manera.

El conducto para la transmisión del agua consiste del espacio anular comprendido entre el exterior del ademe de 30 centímetros y el agujero de 60 centímetros de diámetro. Este espacio se halla relleno de un material altamente permeable, cual es el filtro de grava.

La fórmula que da el flujo vertical a través del filtro de grava, es la siguiente:

$$Q = P\ I\ A$$

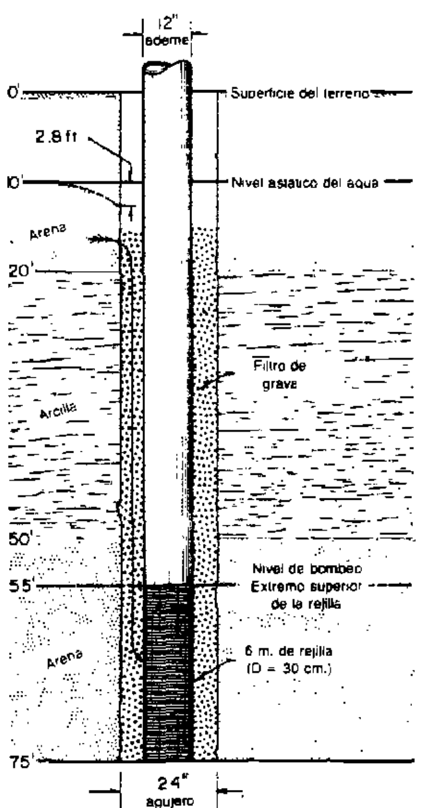


Fig. 154: El flujo posible de establecerse entre el acuífero superior e inferior a través del filtro de grava, es reducido.

expresión en la cual:

- Q = descarga vertical a través del material del filtro, en m^3/día.
- P = coeficiente de permeabilidad del material de grava del filtro en m^3/día/m^2.
- A = área de la sección transversal del filtro anular de grava, en m^2.
- I = gradiente hidráulico que causa el flujo vertical a través del filtro adimensional.

El gradiente hidráulico es igual a la carga disponible para impulsar el agua, dividida por la distancia a través de la cual debe desplazarse esta. En nuestro ejemplo, la carga disponible es de 13.5 m., que corresponde a la distancia entre el nivel dinámico del pozo y el nivel estático del acuífero superior. La distancia a través de la cual debe desplazarse el agua proveniente de arriba, es de alrededor de 15 m. y corresponde a la distancia que media entre un punto en el centro del espesor del acuífero superior y otro situado a la mitad de la longitud de rejilla. En este caso, en consecuencia, el gradiente es igual a 13.5/15.0 = 0.9. A = 0.2042 m^2, es el área de la sección anular del filtro. El coeficiente de permeabilidad del material del filtro debe estimarse. Un valor razonable máximo para materiales de filtro, es de unos 814 m^3/dia/m^2.

Por lo tanto, la cantidad de agua que es transmitida verticalmente en este ejemplo es de:

$$Q = 814 \times 0.9 \times 0.2042$$
$$= 153.85\ m^3/\text{día ó } 0.11\ m^3/\text{minuto.}$$

Esta contribución resulta ser una pequeña fracción de la cantidad total de agua que se podría bombear de este pozo hipotético. Si el acuífero inferior tiene un coeficiente de transmisividad de 814,000 m^3/dia/m^2, y tratándose de un pozo eficiente que podría brindar una capacidad específiea de unos 124 litros por minuto por metro de abatimiento, un abatimiento razonable de alrededor de 14 metros podría hacer que la formación inferior, por sí sola, erogara unos 1,700 litros por minuto, o sea, 1.7 m^3/minuto. Por lo tanto, el caudal agregado por el flujo vertical es de solamente un 6.4 por ciento, aproximadamente.

El Estabilizador de la Formación

Si se introduce arena gruesa limpia o una mezcla de arena y grava para rellenar el espacio anular vacío que se forma alrededor de la rejilla en un pozo perforado por el método rotatorio, se obtiene una gran ventaja en el momento de terminar el pozo mediante desarrollo natural.

El término *estabilizador de la formación* se ha ideado para describir el material que se utiliza con este propósito. Este término distingue a este material de aquel otro material uniforme y de especial gradación, que se emplea en un filtro artificial de grava. El estabilizador de la formación es una mezcla menos uniforme de tamaños de granos. Además, se coloca antes de completar un pozo desarrollado en forma natural.

Al perforar dentro de una formación acuífera por el método de rotación, se hace necesario que el diámetro de la perforación sea algo mayor que el diámetro exterior de la rejilla, lo que permite una tolerancia suficiente, para la instalación de la misma, sin que existan interferencias mientras ésta se hace descender hasta el fondo del agujero. El diametro del agujero perforado es por lo general de unos 10 centímetros más grande que la rejilla, lo que deja un espacio anular libre de unos 5 centímetros alrededor de ésta. Siempre resulta beneficioso el rellenar, aunque sea parcialmente, este pequeño espacio alrededor de la rejilla, para evitar que materiales limosos y arcillosos de la parte situada por encima del acuífero se derrumben cuando da comienzo el proceso de desarrollo. Si tales derrumbes se evitan, el desarrollo apropiado del pozo se llevará a cabo más fácilmente.

El material que se usa para constituir un estabilizador de la formación no necesita ser de una gradación tan especial como el de un filtro artificial de grava. Una mezcla de arenas que tenga una gradación parecida o ligeramente más basta que la de la misma formación, dará un mejor resultado.

Los tamaños de las aberturas de la rejilla deberán escogerse de manera que permitan efectuar el desarrollo natural de los materiales acuíferos que se encuentran alrededor de aquella, como si no existiese el estabilizador. Las partículas más finas del estabilizador pasarán a través de la rejilla durante el desarrollo. Lo anterior contrasta con el procedimiento que se emplea cuando se ha colocado un filtro artificial de grava, en el que las aberturas de la rejilla se han escogido deliberadamente de un tamaño tal que retengan prácticamente todas las partículas del filtro artificial.

En este caso no es necesario proveer mecanismos especiales para centrar la rejilla en el agujero, como corrientemente se hace en el caso del filtro de grava. El hecho de que el estabilizador de la formación no rodee completamente a la rejilla, no tiene mayor importancia. Habiendo escogido las aberturas de la rejilla, de modo que permitan el desarrollo cabal de la formación, no es esencial el empleo de material adicional para llevar el pozo hasta una condición de total ausencia de arena.

Colocación del Estabilizador de la Formación

No es necesario tomar precauciones especiales al colocar el estabilizador, como es el caso cuando se utiliza un filtro artificial de grava. Se puede permitir al material que se asiente en el fluído de perforación alrededor del ademe del pozo y de la rejilla, sin necesidad de usar un tubo de vaciado.

La cantidad de estabilizador de formación que se necesita colocar, deberá ser suficiente como para llenar el espacio anular vacío alrededor de la rejilla y del ademe del pozo, hasta un nivel que se halle a unos 9 metros por encima del extremo superior de la rejilla. Como gran parte del material del estabilizador se escurrirá a través de la rejilla durante el desarrollo, es de esperarse que se produzca un asentamiento considerable de aquél.

La eliminación de las partículas más finas del estabilizador, al mismo tiempo que se remueven los finos de la formación natural, ayuda grandemente a que se rompa la capa de lodo del agujero en el intervalo enrejillado. La labor de desarrollo suspende y agita las partículas del estabilizador. Como cierto asentamiento tiene lugar, el movimiento general del material tiende a erosionar la camada filtrante que se forma durante la perforación del agujero.

El estabilizador de la formación que rellena el espacio alrededor del ademe y por sobre la rejilla, no cambia de gradación durante el desarrollo. Esta parte del estabilizador evita que el lodo de perforación y el limo y la arcilla de los estratos sobreyacientes desciendan hasta la rejilla.

La remoción de las partículas más finas, tanto del estabilizador como de la formación acuífera, mejora grandemente la permeabilidad de la envoltura de material más grueso que llega a desarrollarse alrededor de la rejilla. En la Fig. 155 se muestra el cambio que se manifiesta en la gradación de un estabilizador de formación como resultado del desarrollo del pozo.

En esta formación y según lo sugiere el análisis de las muestras del material del acuífero, debería utilizarse una rejilla para pozo con abertura No. 40. En la curva de la izquierda de la Fig. 155, se observa que la ranura No. 40 permitiría que alrededor de un 60 por ciento del material del estabilizador pasara a través de las aberturas de la rejilla durante el desarrollo.

La permeabilidad del material del estabilizador, que viene representada por esa curva, es de unos 69.2 m³/día/m². Después de la eliminación de la mayor parte de las

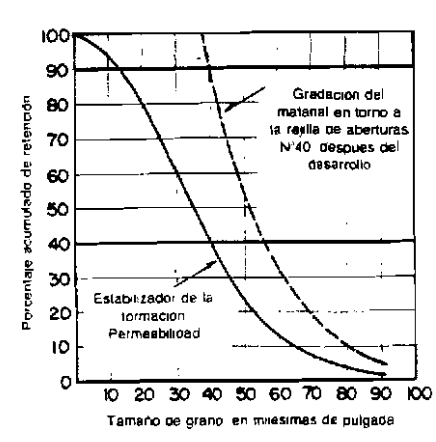


Fig. 155: Curva granulométrica de un estabilizador de la formación y curva correspondiente a la fracción más gruesa de este mismo material, la cual queda situada alrededor de la rejilla del pozo, una vez desarrollado éste.

partículas menores que 0.040 pulgadas, (1.00 mm), la gradación cambió, tal como lo muestra la curva de la derecha en la misma Fig. 155. Ello aumentó la permeabilidad a 610.8 m³/día/m², o sea, unas 9 veces el valor original.

El estabilizador de la formación, representado por la Fig. 155, corresponde a una arena típica para concreto o mortero. Tal material se puede obtener fácilmente en cualquier lugar y a bajo costo. Este tipo de arena basta sería apropiada para usarse en un amplio rango de condiciones, en formaciones acuíferas. Se adapta muy bien como material de relleno cuando la arena acuífera requiere del uso de aberturas de rejilla tan pequeñas como la No. 20 (0.020 pulgadas) ó 0.5 mm. También resulta apropiado usarla cuando los materiales del acuífero natural son de una gradación tal que permiten el empleo de aberturas de ranura No. 50 (0.050 pulgadas ó 1.25 mm.).

Diseño de Pozos Domiciliarios

Muchas de las condiciones de diseño que hemos discutido en el caso de pozos eficientes industriales, municipales y de riego y de gran capacidad, se aplican también a pozos domiciliarios y rurales. La elección de las aberturas de la rejilla, metal de fabricación y requisitos de velocidad de acceso, es igualmente válida.

Cada año se perforan millares de pozos para viviendas suburbanas y fincas, cuyos requisitos de producción son del orden de 18 a 120 litros por minuto. Para estas descargas, la utilización de rejillas de gran longitud en aquellos acuíferos de relativo gran espesor, sería antieconómica. Sin embargo, tanto el finquero como el propietario de casa, necesita un abastecimiento digno de confianza que se obtenga a un abatimiento razonable. Se hace entonces necesario escoger una alternativa entre el costo del pozo y la eficiencia del mismo. No se pueden establecer reglas definidas para escoger la longitud de rejilla, pero mediante el estudio de diversos ejemplos de cómo debe utilizarse ésta en casos específicos, se llega a conocer la pauta a seguir.

En las condiciones mostradas por la Fig. 156-A, la longitud de rejilla en un pozo pequeño deberá ser de por lo menos un tercio del espesor del estrato de arena gruesa. En las condiciones indicadas por las Figs. 156-B y 156-D, la longitud de la rejilla debería ser de la misma extensión que el espesor completo del estrato inferior de arena basta. Si tal rejilla no proveyera el área abierta suficiente para la descarga que se desea obtener, deberá entonces extenderse por una corta distancia dentro de la arena de más arriba.

Un pozo pequeño que se haya construído en una formación tal como la que se muestra en la Fig. 156-C, deberá llevarse a una profundidad igual a la del fondo del estrato de arena gruesa. La longitud de rejilla debería ser de alrededor de la mitad del espesor de la arena. Ordinariamente, no sería de utilidad extender más profundamente la rejilla dentro de la arena fina.

Aunque se ha destacado el hecho de que no resultaría económico utilizar rejillas largas en pozos pequeños, debe hacerse énfasis

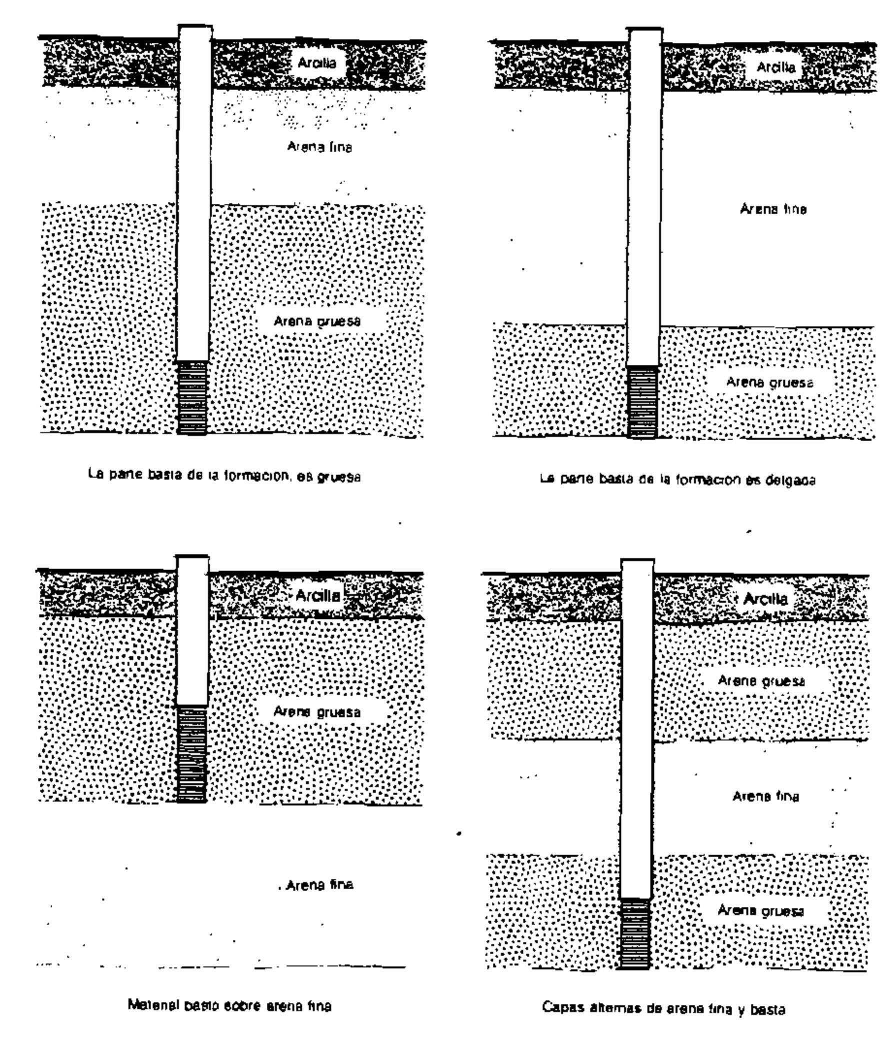


Fig. 156: Emplazamiento recomendado de rejillas de pozo, en varias formaciones acuíferas de arena estratificada.

en que sí es importante dotar a tales pozos de rejillas de longitud apropiada y que dispongan de la capacidad suficiente para satisfacer los requisitos del propietario. La demanda de agua crece invariablemente con el tiempo. Algunos contratistas restringen la longitud de la rejilla, buscando con ello disminuir el costo, sin ponerse a pensar ya sea en la situación del agua subterránea o en las necesidades presentes y futuras del propietario. Ello es más perjudicial para el propietario, que un sobrediseño del pozo.

Muchos pozos suburbanos y de fincas, que escasamente rinden suficiente agua como para llenar las necesidades de su propietario, podrían tener mejor producción si la rejilla fuese ligeramente más larga. El rendimiento de un pozo dotado de una rejilla corta, podría incrementarse casi en proporción directa al aumento de longitud de

aquella, siempre que ese pozo haya interceptado un manto de arena de espesor razonable. Por ejemplo, si una rejilla de 0.90 m. de longitud se utilizara en lugar de otra de 0.60 m., se podría bombear casi un 50 por ciento más de agua con el mismo abatimiento, suponiendo que el acuífero tiene unos 2 ó 3 metros de espesor. Un pozo con una rejilla de 1.20 m., produciría, en estas circunstancias, alrededor de un tercio más de agua que el mismo pozo con solamente 0.90 m. de rejilla.

Deberá recordarse que al aumentar la longitud de la rejilla, si ello es posible, se mejoraría el rendimiento del pozo en mayor grado que si se aumentase su diámetro. Al duplicar la longitud de la rejilla, se puede, en la mayoría de los casos, casi duplicar el rendimiento. Sin embargo, al duplicar el diámetro, sólo se aumentaría el rendimiento en un 10 ó 15 por ciento.

Desde luego, resulta esencial que todos los pozos sean de un diámetro adecuado a la correcta instalación de bombas de capacidad apropiada. Un diámetro apropiado permite también utilizar las herramientas requeridas para desarrollar completamente la formación en los alrededores de la rejilla del pozo.

La Fig. 157 ilustra aquellos puntos fundamentales que deberán tenerse en cuenta al usar rejillas en pozos pequeños. El pozo de fondo abierto que se muestra a la izquierda, es, efectivamente, un pozo con una rejilla demasiado corta. Tal vez es equivalente, hablando en términos hidráulicos, a una rejilla de 15 cm. de longitud. La construcción sugerida por el pozo del centro podría erogar de tres a cuatro veces más agua que el pozo no enrejillado y tiene la ventaja adicional de no bombear arena. Sin embargo, en condiciones de sequía, su rendimiento podría bajar considerablemente, o también, si otros pozos de la localidad causaran un descenso regional del nivel estático. El pozo de la derecha, construído como debe ser, podría brindar 20 veces más agua que el pozo de fondo abierto.

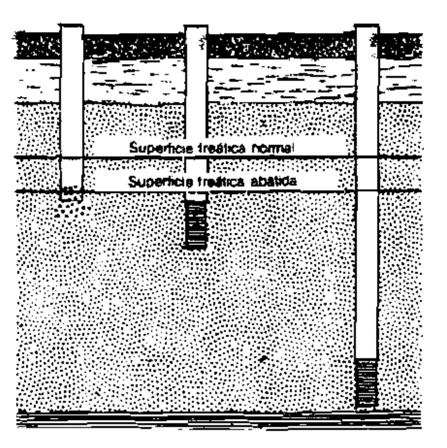


Fig. 157: Los mejores resultados se obtienen escogiendo una rejilla de longitud adecuada y emplazándola de modo que se logren las mayores ventajas.

Diseño para Protección Sanitaria

Debido a las inevitables irregularidades del tamaño del agujero y puesto que éste debe ser necesariamente mayor que el tubo que se use como ademe, es de suponerse que ciertas aberturas se encuentran alrededor del exterior del ademe, sea cual fuere el método de instalación. En esta forma, bien podría ser que agua contaminada, proveniente de drenaje o escurrimiento superficial, o de otras formaciones ajenas al acuífero mismo, se desplace hacia abajo y a través de esos espacios vacíos. Ello daría por resultado la contaminación del agua que está siendo bombeada del pozo. Por regla general, entonces, se necesita algún medio que permita sellar las aberturas que se encuentran por fuera del ademe.

Esta construcción sellada, de la porción ademada del pozo, deberá llevarse hasta alguna formación subsuperficial impermeable que esté confinando al acuífero, o hasta una profundidad segura por debajo del nivel dinámico o de bombeo previsto. Si se siguen ésta y otras reglas, el abastecimiento de agua obtenido del acuífero se hallará libre de bacterias patógenas ya que una construcción adecuada reconstituye los factores naturales

que normalmente protegen a la mayoría de los acuíferos, especialmente a las formaciones arenosas, de la contaminación.

Además de las consideraciones hidráulicas que hemos discutido detalladamente, el diseño de un pozo que vaya a abastecer de agua potable deberá incluir aquellas medidas que al construirlo garanticen la continuidad de la protección sanitaria del abastecimiento.

Se presentan dos interrogantes de importancia en el diseño. Una es hasta qué profundidad mínima deberá instalarse el ademe del pozo para que éste se considere como protección sanitaria. La otra se refiere al sellado efectivo del ademe del pozo dentro de los materiales subsuperficiales, para prevenir la percolación vertical de agua a lo largo del exterior del tubo.

En el diseño de un pozo que se vaya a completar dentro de un acuífero granular, debe considerarse la instalación de un ademe impermeable que se extienda hasta una profundidad de unos 1.50 metros por debajo del nivel más bajo de bombeo que se prevea. Existen excepciones razonables de estas reglas generalizadas y que pueden hacerse cuando un acuífero arenoso y de espesor limitado se encuentra confinado por un manto extenso de arcilla o de algún otro tipo de relleno impermeable.

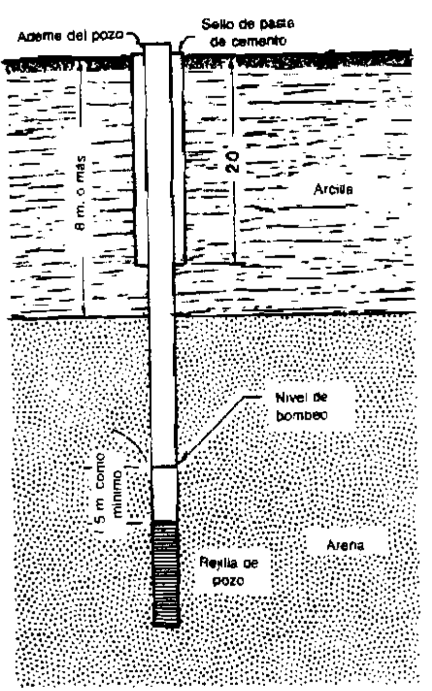
Aquellos pozos que intercepten formaciones de arenisca, deberán diseñarse con un ademe impermeable que pase a través de todo el material de relleno superior y que se asiente firmemente en el basamento. Si hay roca fisurada que yazca sobre la arenisca, el ademe se debería extender unos 4.50 metros o más por dentro de la misma y sellarse por inyección, a lo largo de toda su longitud.

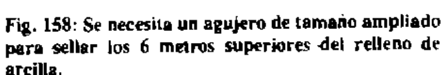
Los pozos que interceptan acuíferos constituídos por roca fisurada o fracturada, deben diseñarse con un ademe impermeable que se extienda hasta una profundidad considerable por debajo de la superficie del tereno y por debajo de cualquier afloramiento rocoso que pueda tener lugar en la vecindad. El objectivo que se persigue con ello, es el de sellar la parte más profunda del acuífero. Cuanto mayor sea la distancia de percolación, mayor será la oportunidad de que las condiciones naturales de protección resguarden la buena calidad del abastecimiento. Aquellas formaciones rocosas que contienen sistemas extensos de aberturas brindan, sin embargo, poca oportunidad para que se lleve a cabo la purificación natural que se manifiesta en las aguas subterráneas que se desplazan a través de materiales no consolidados.

Deberán tomarse medidas, cuando se diseñe un pozo, para sellar con inyecciones el ademe de éste, desde la superficie hasta una cierta profundidad adecuada. Ello implica por lo general el disponer de un agujero de tamaño más grande, hasta la profundidad estipulada, que deje abierto un anillo a través del cual pueda vaciarse el fluído de sellado alrededor del ademe.

La experiencia ha demostrado siempre que el no sellar el espacio anular alrededor del ademe causa que las muestras de agua tomadas en los pozos indiquen la presencia de bacteria coliforme. Aunque se hayan tomado precauciones adecuadas en la superficie del terreno y se emplee ademe en una profundidad suficiente, la contaminación puede manifestarse si el tramo superior de éste no se protege cuidadosamente. Aunque el sellado del ademe se haya realizado con posterioridad a la aparición de los indicios de contaminación, siempre se ha logrado eliminar ésta en casi todos los casos en que los pozos se habían construído en acuíferos del tipo arenoso.

El tamaño adicional que debe dársele al agujero puede consistir en un diámetro mayor cuando las formaciones son estables, tales como arcilla rígida, lutita o roca; o de un ademe provisional del diámetro apropiado. Resulta de mucha importancia retirar el ademe provisional cuando se vaya a hacer el sellado, en lugar de colocar el mate-




Fig. 158: Se necesita un agujero de tamaño ampliado para sellar los 6 metros superiores del relleno de arcilla.

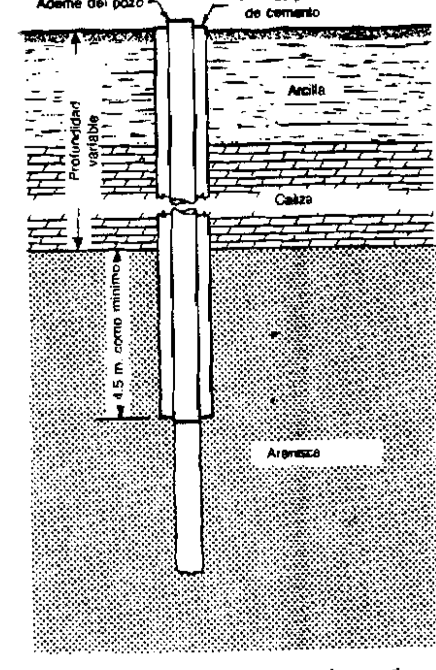


Fig. 159: Cuando el pozo penetre dentro de roca fisurada, el ademe deberá sellarse en toda su profundidad.

rial del sello entre los dos ademes. Siempre podría ocurrir la percolación vertical por el exterior de cualquier ademe que se hubiese dejado sin sellar, dentro del terreno próximo a la superficie.

El agujero agrandado que va a recibir el sello, deberá ser de unos 5 a 15 centímetros mayor que el ademe permante del pozo. Esta extensión de 15 centímetros es necesaria para que el material de sellado se pueda vaciar a través de un tubo auxiliar por fuera del ademe. Cuando el material de sellado se deja caer forzándolo por dentro del ademe para que se desplace hacia el espacio anular, bastará con que el tamaño extra del agujero sea de sólo unos 5 centímetros más que el diámetro del ademe.

La profundidad requerida por el tramo agrandado de agujero, alrededor del ademe, depende de las condiciones geológicas y del sitio mismo. Aquellos pozos emplazados en acuíferos arenosos y en donde el estrato superficial próximo está constituído por materiales arcillosos, deberan sellarse hasta una profundidad de unos 6 metros o algo más.

Los pozos que hayan sido terminados en acuíferos constituídos por areniscas y en los cuales el relleno superior consiste de materiales no consolidados, deberán disponer de un ademe sellado hasta una profundidad mínima de 8 metros. Si la formación sobreyaciente consiste de roca fisurada o fracturada, el ademe deberá sellarse por inyección, en su plena profundidad.

También en aquellos pozos que se hayan construído dentro de acuíferos cuya constitución corresponda a rocas fisuradas o fracturadas, deberá sellarse toda la extensión del ademe.

En un capítulo posterior se describirán los

métodos que se utilizan para sellar y los materiales que se emplean.

Referencias

1. "*Hydraulic Handbook*" pp 28-32 (1959), Fairbanks, Morse & Co., Kansas City, Kansas
2. "*The Vertical Pump by Johnston.*" pp 100-106 (1954). Johnston Pump Company, Pasadena, California.
3. KRUSE, GORDON. "*Selection of Gravel Packs for Wells in Unconsolidated Aquifers.*" Technical Bulletin 66 (1960), Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
4. AHRENS, T. P., "*Water Well Engineering,*" Water Well Journal, Vol. XII, No 11 and 12 (1958), Urbana, Illinois.
5. SMITH, H. F., "*Gravel Packing Water Wells,*" Water Well Journal, Vol VIII No 1 and 2 (1958), Urbana, Illinois.
6. SMITH, R. C "*Relation of Screen Design of Mechanically Efficient Wells.*" Journal, American Water Works Association, Vol 55, No. 5, pp 609-614 (1963), New York.
7. "*Rules for Well Construction and Pump Installation*" (1956) Wisconsin Administrative Code, State Board of Health, Madison

Factores de Conversión de Unidades

Simbolos	*para cambiar*	*en unidades de*	*multiplique por*
s, d, D	pulgadas	milímetros	25.4
s, m, h, H	pies	metros	0.305
A	pulgadas cuadradas	centímetros cuadrados	6.45
Q	galones/minuto	litros/segundo	0.0631
Q	galones/minuto	metros/cúbicos/hora	0.227
Q/s	galones/minuto/pie	litros/segundo/metro	0.745

Capitulo 11

Métodos de Perforación de Pozos

MUCHAS PERSONAS se preguntan, ¿cuál es el mejor método para perforar un pozo? Sin embargo, no existe una respuesta única a esta pregunta. Cada método tiene sus ventajas en lo que respecta a facilidad de construcción, factores de costo, carácter de las formaciones que han de atravesarse, diámetro y profundidad del pozo, protección sanitaria y uso que se le vaya a dar al pozo.

Los métodos para perforar y acabar pozos son tan numerosos, que en este libro sólo podemos describir sus principios fundamentales y algunas de sus aplicaciones. En cada caso, sin embargo, los principios básicos brindan una idea de los límites prácticos de utilización de cada uno de los diversos métodos.

Las condiciones geológicas imponen dos tipos generales de construcción. Un pozo que penetre hasta un acuífero constituído por roca consolidada consiste básicamente de una porción ademada, que usualmente se extiende a través de los materiales sueltos sobreyacientes, y de un agujero abierto en la roca inferior. Un pozo que intercepte un acuífero de arena debe necesariamente dotarse de un ademe en el intervalo correspondiente a los materiales sueltos y de una rejilla en el tramo correspondiente al acuífero.

Es conveniente concebir la construcción de un pozo en términos de cuatro diferentes etapas. Estas incluyen la perforación, la instalación del ademe, la de la rejilla, el sellado, cuando éste último se necesita para protección sanitaria, y el desarrollo, para obtener un funcionamiento libre de arena a un rendimiento máximo. Cuando se impone el uso de un filtro artificial de grava, su colocación se considera parte de la instalación de la rejilla.

Dos o más de estas etapas pueden realizarse simultáneamente, dependiendo del método que se emplee. Cuando se perfora por el método de percusión, en formaciones no consolidadas por ejemplo, el ademe se va instalando conforme prosigue la perforación. Cuando se está hincando una puntera la apertura del agujero, la instalación del ademe y la colocación de la rejilla se realizan al mismo tiempo.

Los métodos para la instalación de rejillas y los procedimientos para la labor de desarrollo se explicarán detalladamente en

capítulos separados que cubren estos tópicos.

Método de Percusión

El método de percusión con herramientas de cable lleva a cabo la operación de perforar, levantando y dejando caer con regularidad una pesada sarta de herramientas dentro del agujero que se va abriendo. El barreno fractura o desmorona la roca dura y la convierte en pequeños fragmentos. Cuando se está perforando en materiales suaves y no consolidados, el barreno afloja el material. En ambos casos la acción de vaivén de las herramientas entremezcla con agua las partículas fracturadas y desprendidas, formando así un lodo. El agua necesaria para formar éste es agregada al agujero cuando no se encuentra presente en la formación que se está penetrando.

El lodo resultante debe ser retirado del agujero de tiempo en tiempo mediante una bomba de arena o de una cuchara. Cuando se acumula mucha columna de lodo, ésta amortigua la caída de las herramientas y retarda la velocidad de penetración. Tal circunstancia es la que determina con cuánta frecuencia deberá extraerse el lodo.

Una sarta completa de herramientas de perforación se halla constituída por cuatro elementos. Estos son: el barreno, la barra de peso, las tijeras de perforar y el portacable giratorio. La barra le imprime un peso adicional al barreno y el efecto de su longitud ayuda a mantener un agujero recto cuando se perfora en roca dura. Las tijeras consisten de un par de barras de acero articuladas. Cuando se está perforando en aquellos materiales en los que el barreno está propenso a quedar aprisionado, se utilizan las tijeras para aflojar las herramientas. Esta es la única función que desempeñan. Las tijeras no sirven para otro propósito en la función misma de perforar.

Cuando ha quedado trabado, el barreno puede liberarse fácilmente mediante un golpeteo de las tijeras dirigido hacia arriba, en tanto que si se aplicara una tensión sostenida, ello haría que el cable fallara o se rompiera. La carrera o desplazamiento de las tijeras es de sólo unos 15 a 23 centímetros. El término tijeras de perforación se emplea para distinguirlas de las tijeras de pesca, que desarrollan carreras desde 45 hasta 75 centímetros.

El portacable giratorio establece la conexión de las herramientas al cable; además, su peso suministra parte de la energía de los golpes ascendentes dados por las tijeras cuando se necesita usar éstas. También permite que las herramientas giren ligeramente con respecto al cable.

Los elementos de la sarta de herramientas se acoplan entre sí mediante extremos roscados de la designación estándar API (American Petroleum Institute)

El cable de alambre que soporta las herramientas de perforar se denomina comúnmente línea de perforar. Por lo general, varía entre 5/8 y 1 pulgada de diámetro y su torcido es en sentido izquierdo. La línea de perforar se hace pasar por sobre una polea de coronamiento que se halla situada en la cumbre del mástil o torre, de donde desciende hacia el cabrestante llegando al tambor principal de arrollado.

La cuchara está formada por un tramo de tubo con una válvula de retención en el fondo. Esta válvula puede ser del tipo plano o del tipo de dardo. El asa del extremo superior de esta herramienta provee el medio para suspenderla de un cable que corrientemente se denomina línea de arena.

La bomba de arena es una cuchara dotada de un émbolo, el cual, al desplazarse hacia arriba, produce un vacío que abre la válvula y succiona la arena o el lodo que contiene los fragmentos, haciéndolos penetrar al tubo. El fondo de la bomba de arena consiste siempre de una válvula de diseño plano.

La línea de arena se hace pasar por sobre una polea separada, en la cumbre de la torre, y luego desciende hasta su tambor de arrollado.

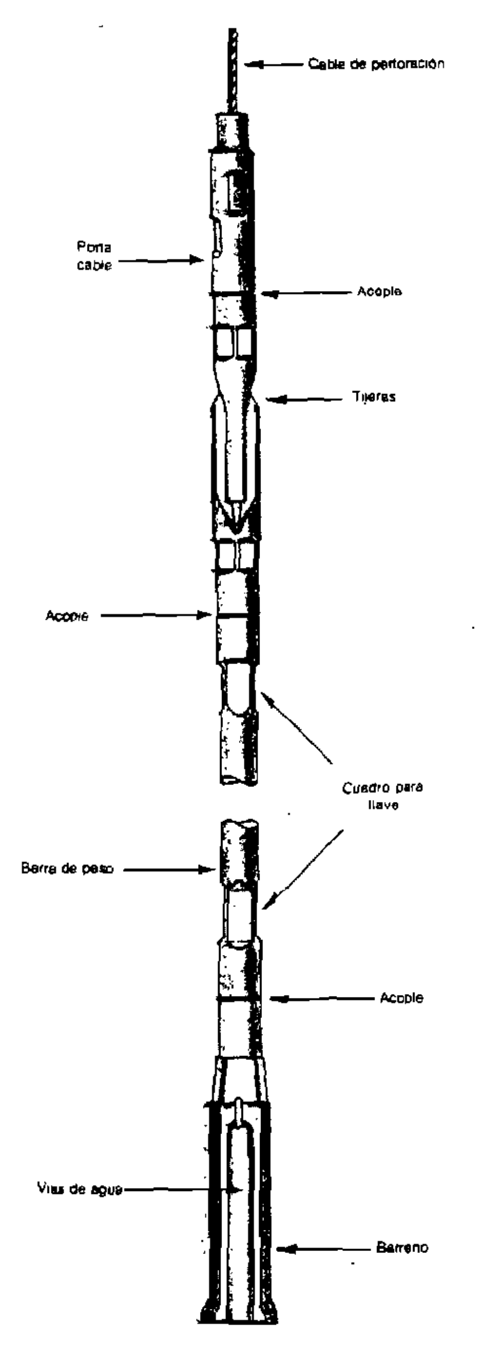


Fig. 160: Los cuatro elementos que componen una sarta de herramientas para perforar por el método de percusión.

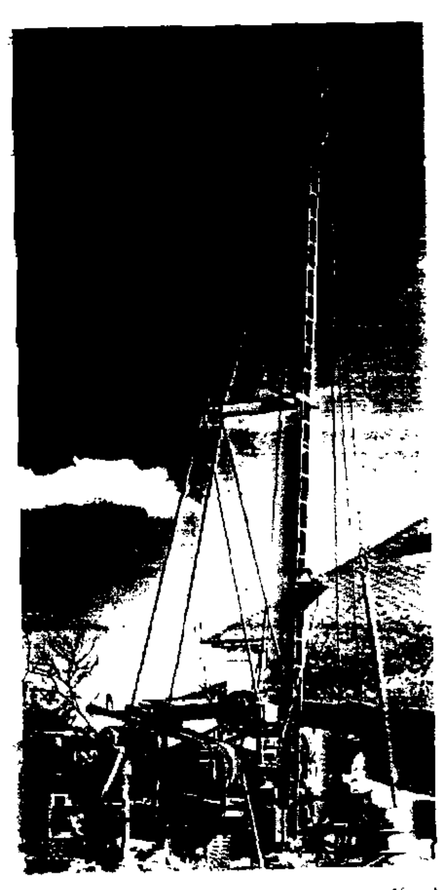


Fig. 161: Máquina de perforar por percusión de mediana capacidad, trabajando en su sitio.
(Cortesía de Clarence Reed)

La acción de sube y baja le es impartida a las herramientas de perforar y al cable correspondiente, por un brazo excéntrico. Este brazo excéntrico pivotea en uno de sus extremos. El extremo exterior, que lleva una polea por la que pasa el cable de perforación, se mueve hacia arriba y hacia abajo mediante la acción de una excéntrica sencilla o doble, la cual se halla conectada al brazo del cigüeñal. Tanto la carrera o desplazamiento vertical, como también la velocidad de acción, pueden cambiarse a voluntad.

El brazo del cigüeñal está movido por un piñón de engranajes montado en un freno de fricción. Este freno, como también el de la



Fig. 162: Los fragmentos y cortaduras extraídos por una cuchara con válvula de dardo son expulsados conforme la válvula es asentada en un bloque de madera.

línea de arena y el piñón del tambor del cable de perforar, se hallan todos montados en el mismo contraeje.

El desplazamiento vertical del brazo del cigüeñal, y el de las herramientas, puede hacerse variar ajustando la posición del eje de la excéntrica en el piñón de aquél; en esta forma, se puede cambiar el número de golpes por minuto con solo hacer variar la velocidad del eje.

El tercer tambor de arrollado, llamado el tambor de ademado, viene por lo general incorporado también a la maquinaria básica de perforación. El tambor de ademado es capaz de ejercer una tensión poderosa sobre un tercer cable, el de ademado. Este se utiliza para manipular tubería, herramientas y bombas; o también para otras pesadas labores de izado. Asimismo, puede utilizarse este tambor para halar una sarta de ademes cuando el cable se acondiciona con un motón para constituir una línea múltiple de izado. En estos casos, bien podría necesitarse reforzar estructuralmente la torre o mástil, para poder aplicar el máximo empuje.

Otro implemento de izar que a menudo se suministra con el equipo de perforación, es un cabrestante pequeño. Para utilizarlo, se necesita una cuerda guiada por una polea separada, colocada a su vez en la cumbre de la torre. Esta línea se utiliza para manipular cargas livianas o para levantar o dejar caer herramientas tales como un bloque de hincado, etc. Para esto se arrollan al cabrestante unas dos o tres vueltas flojas del extremo libre de la cuerda. Cuando aquél está girando, el perforador toma el extremo libre de la cuerda con su mano y da un ligero tirón, haciendo con ello que las vueltas del arrollado de la cuerda se atiranten y traten de frenar el cabrestante. Esto causa que la carga se levante en el otro extremo de la cuerda, cuando el perforador afloja su extremo, la fricción entre la cuerda y la polea en rotación del cabrestante disminuye, cayendo entonces las herramientas.



Fig. 163: Completando un pozo de 10 cm. para una casa en Wisconsin. *(Cortesía de Chester Kempf)*

El Movimiento de Perforacion Debe de Ser el Correcto

Para obtener una buena operación, el movimiento de perforación debe mantenerse sincronizado con la caída por gravedad que experimentan las herramientas. Existen factores variables que interfieren con la caída por gravedad y el perforador debe ajustar el movimiento y la velocidad de la máquina, al ciclo de recorrido de las herramientas.

Se obtiene una acción efectiva de perforacion cuando la velocidad del motor se sincroniza con la caída de las herramientas y con la dilatación del cable, suministrando siempre la correcta cantidad de éste que exige el barreno. El perforador debe atender constantemente a todos estos factores si desea brindar un trabajo eficiente a su cliente.

Es muy importante comprender la función que desempeña el cable en lo tocante al mejor aprovechamiento de las herramientas. El barreno debe golpear en el fondo del agujero, estando el cable tenso, y en esta forma será levantado rápidamente por el impulso ascendente de la máquina. Esto requiere cierta ductilidad y elasticidad del cable y de ciertas otras partes del mecanismo de la sarta.

Por lo general, se instala un amortiguador de choques en la polea de coronamiento del cable de perforación, para obtener un sistema dúctil o elástico. El amortiguador se comprime conforme el brazo excéntrico completa su carrera ascendente y comienza a ejercer tensión sobre el cable. En este momento, la tensión de éste se torna máxima, puesto que las herramientas todavía se hallan en movimiento descendente. La dilatación posterior del amortiguador contribuye a que las herramientas reboten en el fondo tan pronto han golpeado en éste. El objetivo que se persigue es el de impartir a las herramientas ese peculiar movimiento de

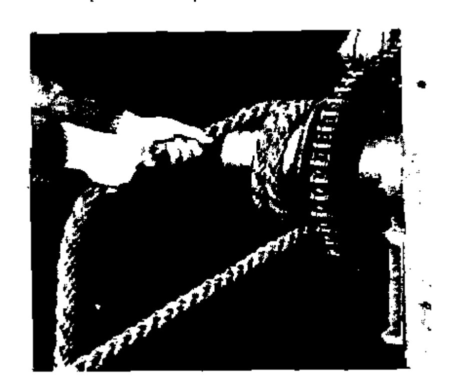


Fig. 164: Se utiliza un cabrestante para arrastrar tubería hacia la sarta.
(Cortesía de Bucyrus-Erie, Co.)

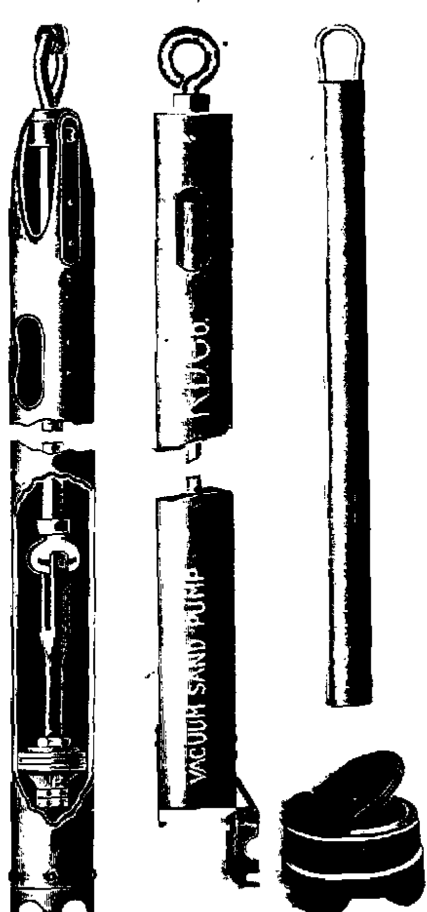


Fig. 165: Bombas de arena y cuchara corriente, mostrando los detalles de las válvulas de fondo plano.

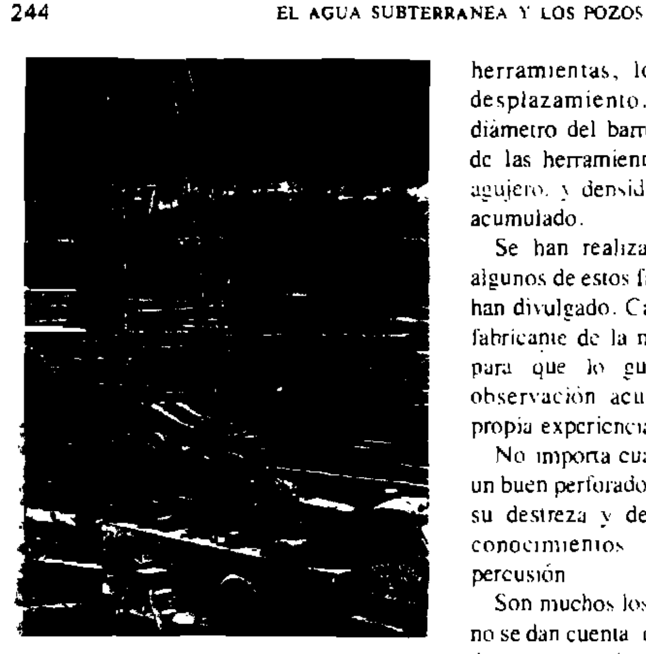


Fig. 166: Colocando ademe dentro del aluvión del Río Ohio. Las gazas de hincado, adheridas a la barra de peso, proporcionan pesados golpes al caer la herramienta. El cabezote de hincado protege el extremo superior del tubo.

flagelo al final de la carrera y que resulta esencial para una perforación rápida. Cuando este movimiento se realiza apropiadamente se conserva la energía y aumenta la velocidad.

Este aditamento también amortigua la vibración que se produce como resultado del golpeteo del barreno en el fondo del agujero. Al mismo tiempo protege a la torre y al resto de la máquina de severos esfuerzos producidos por el impacto.

Cuando se está perforando en roca consolidada, el barreno del sistema de percusión es esencialmente un desmoronador. Su comportamiento depende de los kilógramos-metro de energía que puede suministrar cuando choca con el fondo del agujero, suponiendo que se mantenga un movimiento adecuado de perforación. Los factores que pueden afectar la velocidad de perforación o su eficiencia, son: resistencia de la roca, peso de las herramientas, longitud de la carrera o desplazamiento, golpes por minuto, diámetro del barreno, luz entre los acoples de las herramientas y la pared interior del agujero, y densidad y profundidad del lodo acumulado.

Se han realizado investigaciones sobre algunos de estos factores, pero muy pocas se han divulgado. Cada perforador confía en el fabricante de la maquinaria de perforación para que lo guíe, y agrega a ello la observación acumulada, producto de su propia experiencia.

No importa cuántos años haya trabajado, un buen perforador nunca termina de mejorar su destreza y de aumentar su arsenal de conocimientos en la perforación por percusión

Son muchos los propietarios de pozos que no se dan cuenta que, al utilizar los servicios de un contratista de perforación diestro, están con ello adquiriendo una gran cantidad de experiencia. Los mayores intereses del propietario están garantizados por un buen perforador, que tenga conocimiento de cómo deben hacerse las cosas y que disponga de buena maquinaria.

Perforación en Formaciones Suaves

La perforación en formaciones suaves o no consolidadas difiere de aquélla que se realiza en roca dura, en dos aspectos. En el primer caso, el barreno debe ser seguido de cerca por una tubería o ademe conforme el agujero se va profundizando, con el objeto de evitar el socavamiento y de mantenerlo abierto. Por lo general, el ademe deberá de hincarse, que es una operación parecida a la de introducir pilotes.

En segundo lugar, la acción penetrante del barreno constituye, en su mayor parte, un efecto de aflojamiento y mezclado. La fracturación es de poca importancia, excepto cuando aparecen cantos grandes.

El procedimiento que usualmente se sigue, es el de hacer penetrar el ademe uno o varios metros, lo que da por resultado la

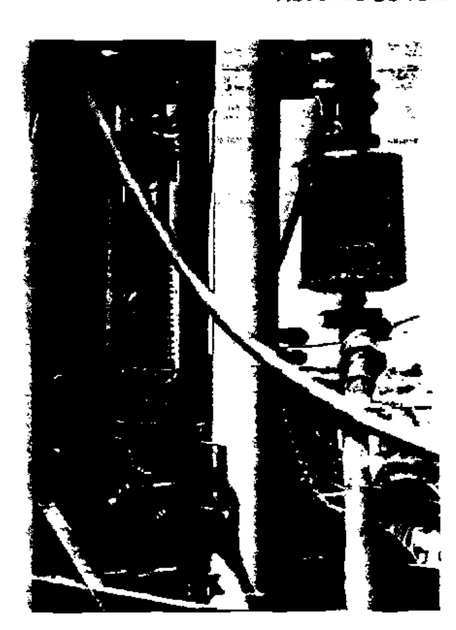


Fig. 167: Bajando ademe de pequeño diámetro, con el cabezote de hincado adherido al extremo superior del tubo.

acumulación de un tapón de material dentro de éste de casi la misma longitud. Este material se mezcla luego con el agua formando así un lodo, el cual es posteriormente extraído con la cuchara conforme el ademe se hace descender de nuevo. Cada vez que se limpia el pozo, debe agregarse más agua si ésta no proviene naturalmente de la formación que se está perforando.

En el extremo inferior de la sarta de ademe, se debe conectar una zapata de hincado hecha de acero templado y endurecido, la que protege el fondo del tubo. Las operaciones de hincado, perforación y limpieza se repiten entonces hasta que el ademe alcance la profundidad que se desea.

Durante la operación de hincado se debe fijar a la parte superior del ademe un cabezote que funciona como yunque. Seguidamente, unas gazas golpeadoras, formadas por dos semicirculos pesados de acero forjado, se ajustan al cuadro próximo al extremo superior de la barra de peso. Estas gazas proveen la superficie del impacto necesaria, y las herramientas el peso apropiado para hincar el ademe. Las herramientas son levantadas y dejadas caer mediante la acción excéntrica de la máquina de perforar.

Cuando se está penetrando en formaciones suaves, la operación de hincar ademe consume tanto tiempo como las de perforar y mezclar. El perforador experimentado y alerta que ha desarrollado destreza en hincar tubería, puede aventajar a otro operador no tan diestro en una proporción de casi cuatro a uno. Resulta obvia la economía que se obtiene al ejecutar el trabajo cuidadosa y diestramente.

La variedad que existe en la naturaleza de las formaciones constituidas por arcilla, arena, grava, marga y mezclas de todas ellas, afecta profundamente la velocidad de hincado. El peso más apropiado y el ajuste de la carrera de la excéntrica para obtener el impacto adecuado, son establecidos mediante la experiencia.



Fig. 168: Cuando se está perforando dentro de una formación seca, debe agregarse agua al pozo. Obsérvese el tubo más grande que se está usando como ademe provisional.

Cuando se está hincando tubería de pequeño diámetro, se usa algunas veces un bloque en lugar de las gazas, el cual se fija a la sarta de herramientas de perforar. En la Fig. 167 se muestra este bloque fijado a la parte superior de la tubería cuando se está hincando ésta. El bloque es levantado y dejado caer mediante la cuerda de manila y el cabrestante auxiliar descrito anteriormente.

Cuando la fricción desarrollada en la superficie exterior del ademe aumenta hasta el punto en que éste no puede descender a mayor profundidad, o si una penetración mayor pudiese dañarlo, debera introducirse un tubo de menor diámetro por dentro del primero. La perforación se continúa entonces por la parte interior del ademe menor. En este caso, necesariamente se reduce el diametro del agujero, al extremo de que algunas veces se necesita hacer una, dos o tres reducciones antes de que se logre llevar el pozo hasta la profundidad que se desea. Ante esta posibilidad, la perforación se empieza a menudo con un diámetro de uno o dos tamaños más grande que el diámetro que se haya escogido para la terminación del pozo.

Método Californiano

El método californiano de perforación utiliza los mismos principios que el método de percusión, con excepción de tres aspectos: una pesada cuchara denominada cucharón de lodo se utiliza al mismo tiempo como barreno y como cuchara; en lugar de tubería estándar de acero, se usan como ademe tubos cortos de acero laminado; se emplean a su vez gatas (o gatos) hidráulicas para introducir el ademe, en vez de emplear las herramientas para producir el impacto necesario.

El extremo inferior del cucharón de lodo se halla provisto de una válvula de fondo plano, una pesada zapata y una barra cortadora a través del circulo del fondo, suficientemente fuerte como para que corte y afloje la arcilla, arena o grava. El extremo superior del cucharón de lodo está provisto de una pesada horquilla fijada a aquél mediante un acople de rosca. Puede agregarse, si se desea, una barra corta para obtener un mayor peso. Algunas veces se utilizan las tijeras de perforar para que el golpeteo que éstas permiten efectuar pueda destrabar el barreno.

El ademe que se utiliza consiste de dos tamaños de cilindro de acero soldado, pudiendo el mayor entrar ajustadamente sobre el menor. Los tubos se construyen de lámina de acero, relativamente delgada. Cada cilindro es de unos 1.20 metros de longitud, con sus extremos a ángulo recto para que topen bien con los extremos adyacentes. Cada tramo exterior traslapa la mitad de su longitud con el tramo interior, dejando alternas las juntas de tope, cada 0.60 m. Los cortos tramos de ademe se utilizan para ajustar el desplazamiento o carrera de las gatas hidráulicas. Conforme el ademe se va instalando en el sitio, las juntas se preparan mediante soldadura de puntos.

El procedimiento que se sigue al empezar un pozo, consiste en excavar un foso para acomodar las gatas hidráulicas, los anclajes de éstas y la tubería de iniciación. En el centro de este foso, se coloca en posición, un tramo de 3 m. de tubería. En el fondo del foso se tienden unos travesaños o muertos de madera o de acero, a los cuales se fijan las gatas. Estos travesaños se entierran rellenando el foso una vez que el equipo ha sido colocado en éste. Por lo general, se emplean gatas de 20 centímetros con desplazamientos que van desde 1.20 a 1.50 m.

Un anillo provisto de lengüetas, que se conectan a los pistones de las gatas, se fija al extremo superior del ademe. Conforme el cucharón de lodo remueve los materiales de la parte inferior del ademe, las gatas hidráulicas empujan éste hacia abajo. Cuando el ademe ha sido hundido hasta la profundidad que se desea, se emplea un

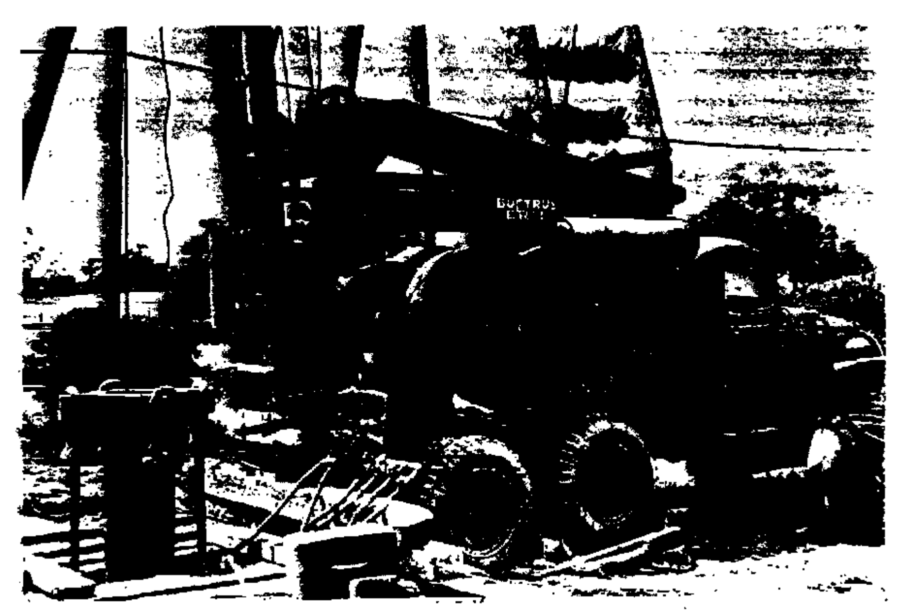


Fig. 169: Aplicacion del empuje hidraulico cuando se hinca ademe mediante el método californiano de perforación.

perforador de ademe para producir ranuras en la tubería a aquellas profundidades en que el registro del pozo indique la presencia de arena o grava acuíferas. El tamaño de las aberturas producidas por el perforador de ademe es muy irregular y los pozos perforados por este sistema a menudo erogan grandes cantidades de arena. Normalmente no se puede utilizar una rejilla adecuadamente escogida, puesto que los acoples del ademe son muy débiles como para permitir que éste puede extraerse y dejar expuesta la rejilla, frente al acuífero.

Este método de perforación ha sufrido modificaciones durante el tiempo en que ha estado en uso. En algunas partes no resulta difícil aún observar un cucharón de lodo funcionando mediante el cable de un equipo convencional de perforación por percusión, y con tubería estándar utilizada como ademe. En tales casos el cucharón viene a ser esencialmente una herramienta usada en lugar de las herramientas convencionales de percusión. La tubería se hinca a menudo utilizando gazas o abrazaderas en lugar de empujarse hacia abajo por medio de las gatas hidráulicas. El empleo de tubería de conducción a guisa de ademe, hace posible la instalación de rejillas eficientes, al completar el pozo, sin tener que recurrir al perforador de ademe, para abrir los orificios que permitan la entrada del agua.

Perforación por el Método de Rotación

El método hidráulico de perforación por rotación consiste en oradar un agujero mediante la acción rotatoria de un trépano y remover los fragmentos que se producen con un fluído que continuamente se hace circular, conforme el trépano penetra en los materiales de la formación. El trépano se fija al extremo inferior de una sarta de tubería. En el sistema convencional rotatorio, el fluído o lodo de perforación es bombeado a través de la tubería y expulsado por las boquillas de ésta. El lodo, entonces, fluye verticalmente hasta la superficie a través del espacio anular que se halla alrededor de la tubería. Ya en la superficie del terreno, el fluído se conduce hasta un foso de

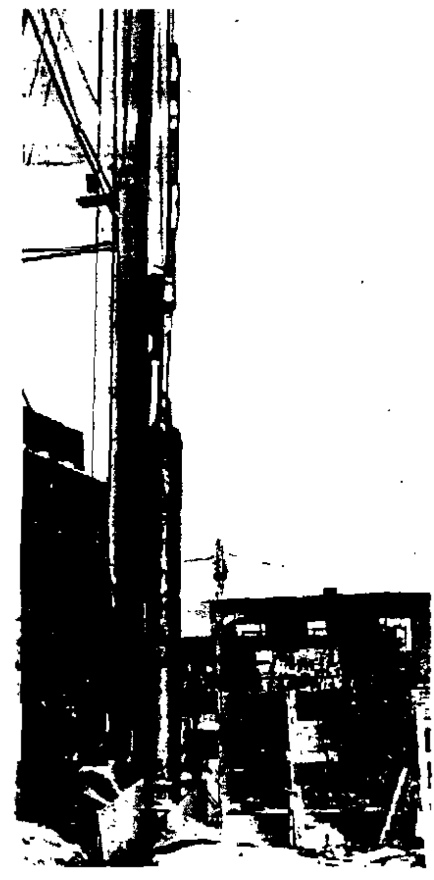


Fig. 170: Cucharón de lodo con las tijeras y el *enchufe para el cable.*

sedimentación y de ahí a otro de reserva. En éste, es de nuevo succionado por la bomba una vez que su contenido de fragmentos se haya sedimentado.

Antes de alrededor de 1920, el tipo de perforación rotatoria que se usaba para perforar pozos de agua se denominaba comúnmente remolino. El equipo utilizaba corrientemente el mismo ademe del pozo como tubería de perforación. El extremo inferior de la tubería se acondicionaba con una zapata de corte de forma de sierra cuyo diámetro exterior era un poco mayor que los acoples de la tubería. Los dientes de sierra de la zapata cortaban y aflojaban el material conforme a la tubería se le imprimía el movimiento de rotación. Luego, se bombeaba agua a presión a través de la tubería, para así poner en suspensión los fragmentos de la perforación y llevarlos a la superficie. Se agregaban arcilla y limo naturales para sellar las paredes del agujero y poder mantener en esta forma la circulación del fluido; no se usaban entonces lodos o fluídos especiales. El método se adaptaba solamente a la perforación de formaciones relativamente suaves que no contuvieran guijarros o cantos.

En los años próximos a 1930, se encontró aplicación en la perforación de pozos de pequeño diámetro, a las perforadoras rotatorias que horadaban los agujeros para explosión, en los trabajos sismográficos de investigación petrolera. El desarrollo de los equipos portátiles de perforación, montados en camión, dotados de todos los elementos necesarios para un funcionamiento flexible y eficiente, tuvo su origen en esa actividad.

Las máquinas que abrían los agujeros para explosivos, carecían de condiciones para perforar en un rango suficientemente grande de tamaños de pozos. La bomba de lodo y la tubería de perforación eran por lo general muy pequeñas como para poder llevar el volumen de fluído de perforación que ha de hacerse circular cuando se quiere perforar eficientemente pozos de 20 ó 25 centímetros de diámetro.

Los dos elementos clave en el método de perforación por rotación, son el trépano y el fluido. Ambos resultan indispensables al cortar y mantener el agujero. Todos los componentes que constituyen la máquina de perforación por rotación, se diseñan para realizar simultáneamente estas dos funciones: operación del trépano y circulación del fluido de perforación.

Es fundamental tener en cuenta la interrelación esencial del trépano con el fluído, para comprender claramente los fundamentos de la perforación rotatoria. También su conocimiento es necesario, para

lograr una operación apropiada de la perforadora, y además es la base para interpretar los resultados de las perforaciones rotatorias de prueba y en la completación de aquellos pozos de producción perforados por este sistema.

En este sistema se emplean dos tipos generales de trépanos, a saber: el de rodetes dentados, usualmente denominado trépano para roca, y el de arrastre, que comprende el de tipo de cola de pescado o el de tres aletas. Los trépanos de arrastre contienen aletas cortas, cada una de las cuales tiene un filo cortante forjado y que ha recibido un tratamiento endurecedor en la superficie. Unas boquillas o eyectores cortos dirigen chorros de fluido de perforar por debajo de las aletas para mantenerlas limpias y enfriarlas. Los trépanos de arrastre ejercen

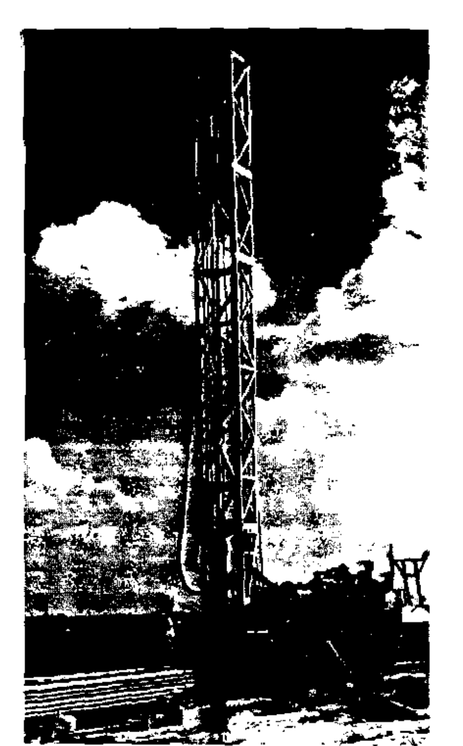


Fig. 171: Máquina rotatoria convencional, diseñada para taladrar pozos de agua en profundidades de hasta 300 metros. *(Cortesía de Bucyrus-Erie Co.)*

rápidamente su acción cortante en arcillas y arenas pero no funcionan bien en grava gruesa o en formaciones rocosas.

El trépano de rodetes dentados ejerce una acción cortante y de trituración, logrando cortar las formaciones duras con efectividad. Los rodetes o cortadores son dotados de dientes endurecidos de gran variedad de formas y separación.

Desde el interior del trépano y en la parte superior de cada rodete, se hace dirigir un chorro de fluido de perforación que lava las superficies que han sido cortadas. El trépano cónico contiene rodetes de forma cónica, montados sobre ejes y cojinetes colocados a cierto ángulo con el eje del trépano. Otro diseño tiene cuatro rodetes o cortadores, dos de los cuales están fijados a un ángulo y los otros dos normalmente, al eje vertical del trépano.

Por la aceptación que tiene, es evidente que el trépano tricono es el mejor que puede escogerse. La elección de los cortadores, y el número y longitud de los dientes, depende principalmente del tipo de formación que haya de penetrarse.

El trépano funciona en el extremo inferior de la barra de perforación, que esencialmente consiste de un eje tubular largo. La barra de perforar consta de tres partes: una o más barras de peso, justamente por encima del trépano; uno o más tramos de tubería de perforación y el vástago giratorio (kelly).

Cada barra de peso viene a ser en efecto un tramo de tubería de perforación de pared gruesa. Se utilizan una o más barras para agregar peso a la parte inferior del conjunto. Esta concentración de peso, justamente por encima del trépano, contribuye a mantener el agujero recto y vertical.

La tubería de perforación consiste de conductos sin costura, por lo general en tramos de 6 m. de longitud, con un acople macho en un extremo además de uno hembra en el otro. Los tamaños de tubería de perforación que por lo general se emplean,

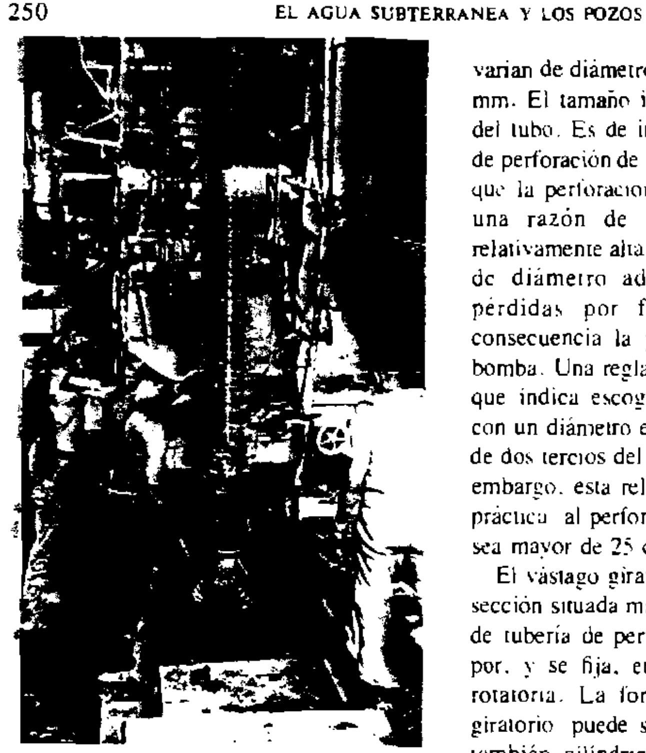


Fig. 172: La barra agrega peso directamente por encima del trépano de rodetes que se observa en la fotografía. *(Cortesía de Frederickson s. Inc*

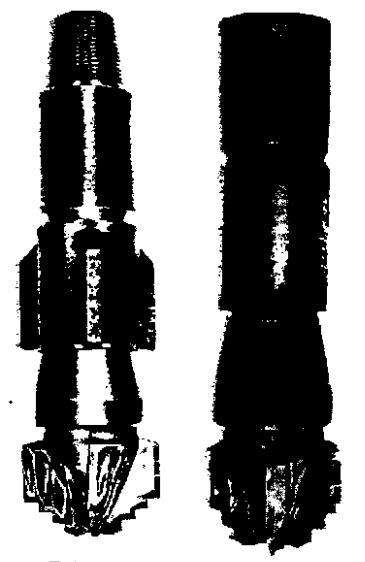


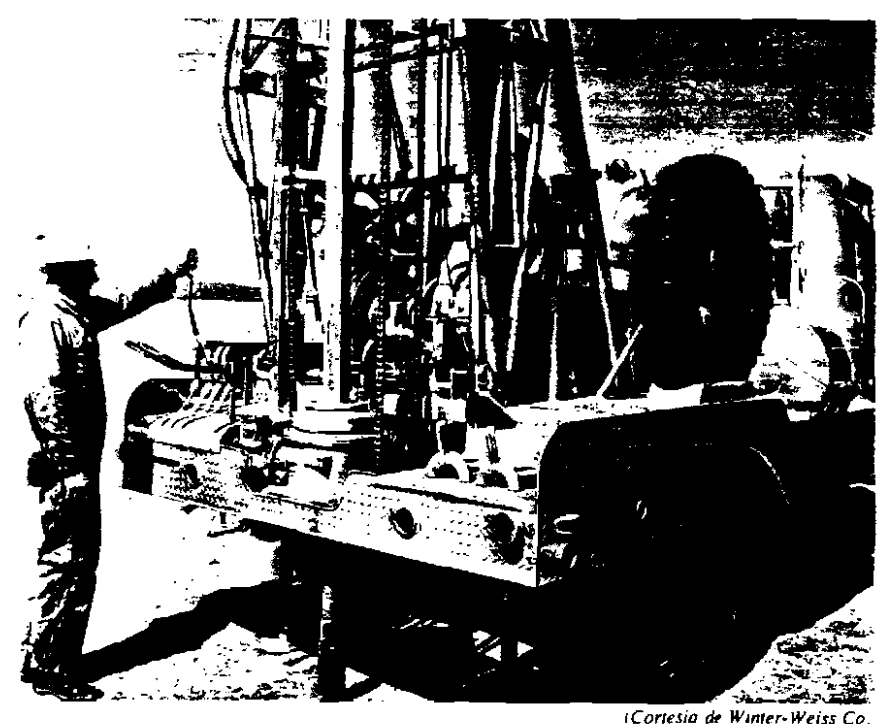
Fig. 173: Trépanos del tipo de arrastre, con aletas reemplazables. *(Cortesía de Hughes Tool Co.)*

varían de diámetro, desde 60 mm. hasta 114 mm. El tamaño indica el diámetro exterior del tubo. Es de importancia utilizar tubería de perforación de diámetro adecuado, puesto que la perforación de pozos de agua exige una razón de circulación del fluído, relativamente alta. La tubería de perforación de diámetro adecuado disminuye las pérdidas por fricción en ésta y en consecuencia la potencia que demanda la bomba. Una regla que puede seguirse es la que indica escoger tubería de perforación con un diámetro exterior de acople que sea de dos tercios del diámetro del agujero ; sin embargo, esta relación puede resultar poco práctica al perforar agujeros cuyo diámetro sea mayor de 25 centímetros.

El vástago giratorio (kelly), constituye la sección situada más alto de toda la columna de tubería de perforación. El vástago pasa por, y se fija, en la abertura de la mesa rotatoria. La forma exterior del vástago giratorio puede ser cuadrada, hexagonal o también cilíndrica, con ranuras o surcos longitudinales cortados en la pared exterior. El vástago giratorio se fabrica con unos cuantos centímentros más de longitud que cualquier tramo de tubería de perforar. Su oquedad cilíndrica interior es menor que la de la tubería, debido al grueso espesor de pared que necesita.

La sección cuadrada, hexagonal o ranurada del vástago se desliza hacia arriba y hacia abajo a través de cojinetes de guía situados en la mesa rotatoria. Con sus cojinetes debidamente colocados a su alrededor, la barra completa de perforación y el trépano son forzados a girar conjuntamente con la mesa rotatoria. Mientras gira, el vástago se desliza hacia abajo entre los cojinetes de guía para seguir el descenso del trépano conforme el agujero se hace más profundo.

El extremo inferior del vástago giratorio está provisto de un sustituto de acople para conectarlo a la tubería de perforación. El sustituto evita que el acople del vástago sufra



(Cortesía de Winter-Weiss Co.

Fig. 174: Componentes de un equipo de perforación rotatoria, mostrando un vástago giratorio (kelly) de sección cuadrada, la mesa rotatoria, las cadenas de tiro, los controles del operador y los tambores de izado.

el desgaste excesivo que resulta de enroscarlo y desenroscarlo cada vez que se hace necesario agregar o retirar un tramo de tubería de perforación. El extremo superior del vástago va conectado a un eslabón giratorio con acople de rosca izquierda, que permite el paso del fluído de perforación.

La sarta completa de perforación se suspende de un eslabón giratorio que permite el paso del agua, el cual a su vez se halla suspendido del mástil o torre por medio de una polea viajera. Un resistente cojinete de empuje axial, instalado entre las dos partes del eslabón, soporta todo el peso, permitiendo a la sarta de perforación que gire libremente.

Formación de la Camada Filtrante

Conforme progresa la perforación, se va formando en las paredes del agujero un filtro de lodo o camada filtrante. Este revestimiento de condición plástica, constituido por limo, arcilla y coloides se forma debido a un efecto filtrante, cuando la presión del fluído de perforación expulsa una parte del agua de éste. La camada filtrante reviste las paredes del agujero y retiene algunas partículas sueltas de materiales desmenuzables. Al mismo tiempo, protege a las paredes de la erosión o lavado que podría producirse con la corriente ascendente del fluído de perforación. A su vez, sella las paredes del agujero y reduce la pérdida del fluído hacia las formaciones permeables.

La camada filtrante retiene partículas sueltas en su sitio porque ésta es pegajosa y plástica; pero en ningún momento podría evitar que una pequeña presión exterior produjese el colapso del agujero. La resistencia al colapso se obtiene mediante la presión hidrostática del fluído dirigida

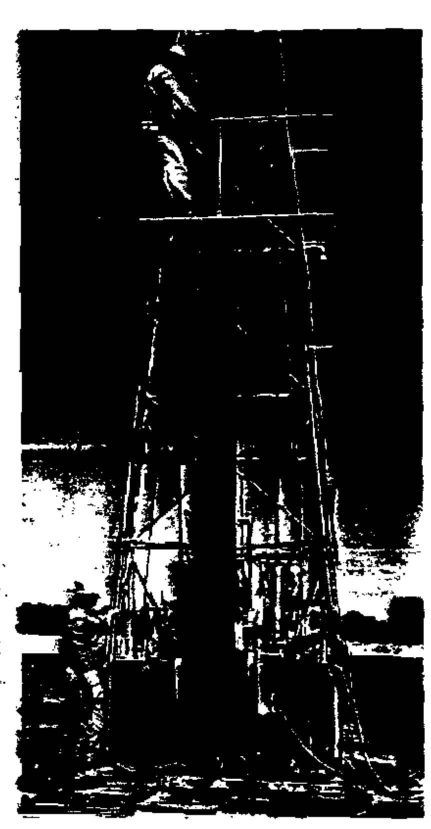


Fig. 175: Colocando ademe en un agujero perforado por el método de perforacion rotatoria a base de lodo. *(Cortesía de Geo. E. Failing Co.)*

radialmente hacia afuera. El revestimiento filtrante debe sólo concebirse como una membrana o cobertura flexible similar a un balón de hule colocado dentro del agujero y relleno de fluído de perforación.

Fluído de Perforación

El fluído de perforación puede ser cualquiera, desde una agua lodosa hasta una mezcla viscosa hábilmente preparada con materiales ad hoc. Es muy importante comprender las funciones esenciales del fluído de perforación. Este debe realizar lo siguiente:

1. Proteger las paredes del agujero del socavamiento.
2. Recoger los fragmentos del fondo del pozo.
3. Sellar las paredes del agujero, para reducir la pérdida de circulación.
4. Mantener los fragmentos en suspensión cuando la circulación cesa.
5. Enfriar y limpiar el trépano.
6. Lubricar los cojinetes del trépano, la bomba de lodo y la tubería de perforación.

El lodo de perforar retiene el agujero y evita su socavamiento, mediante la presión que ejerce sobre las paredes del mismo. En tanto la presión hidrostática de la columna de fluído supere a la presión de las formaciones y a cualquier presión artesiana que pudiese manifestarse, y que tenderían a derrumbar el agujero, éste permanecerá abierto. La presión del fluído a cualquier profundidad proviene del peso de la columna correspondiente que se halle por encima del nivel estático, más la diferencia entre los pesos del lodo y del agua, en el intervalo comprendido entre el nivel estático y el punto de interés.

No existe ninguna fórmula matemática que permita cualcular la presión que tendería a derrumbar un agujero circular rodeado de diversos materiales terrestres a varias profundidades. El peso del lodo que se necesitaría no se puede, entonces, predecir con exactitud. En la práctica, el perforador se basa en su experiencia pasada para preparar el fluído. Si empieza a tener problemas por socavación mientras se halla perforando, el perforador agrega más bentonita o algún otro material pesado, para aumentar el peso del fluído y así poder desarrollar la presión que necesita dentro del agujero para evitar su tendencia a derrumbarse.

El espesamiento del lodo, para aumentar su peso, puede lograrse hasta donde se desee. Se puede llegar a un punto tal en que la bomba tendría dificultad para impulsar un fluído tan viscoso a través del sistema. En tal caso, deberán emplearse materiales especiales agregados al fluído para aumentar su densidad sin que aumente la



Fig. 176: Detalles de un acople macho instalado en un tubo de perforacion reforzado interiormente.

viscosidad. Se dispone de cierta cantidad de aditivos que le pueden impartir propiedades especiales al fluído de perforación.

La habilidad de un fluído para mantener partículas en suspensión crece rápidamente conforme la velocidad y la viscosidad de éste aumentan. Después de que las cortaduras o fragmentos son llevados a la superficie, es esencial que éstas sean separadas del lodo, conforme el fluído se desplaza por el foso del sedimentación, a una velocidad reducida. Los resultados que se desean se obtienen mediante la regulación de la viscosidad y el peso del lodo, ajustando la velocidad de la bomba y dándole una conformación adecuada a los fosos de sedimentación.

La cantidad de fluído que pasa a la formación y el desarrollo de la camada filtrante en la pared del agujero, varían con la porosidad de los materiales que se están perforando como también con el carácter del fluído. Las propiedades del fluído para constituir la pared filtrante incluyen viscosidad, densidad y consistencia gelatinosa. Estas propiedades son controladas cuidadosamente y con toda precisión en la perforación petrolera, pero por lo general no reciben igual consideración al perforar pozos de agua.

En ambos casos, resulta importante cuán extenso es el desplazamiento del fluído en los poros de la formación productora. Las arenas que forman buenos acuíferos son mucho más permeables que las mejores arenas portadoras de petróleo, por lo que una cantidad apreciable de lodo bien podría invadir la formación acuífera. La invasión de lodo continúa hasta que los poros de la formación se obstruyen. Una vez que la obstrucción se ha desarrollado, se forma entonces la camada filtrante en las paredes del agujero.

En arena y grava gruesas, se pueden perder grandes cantidades de fluído en la formación antes de que la pared del agujero se haya sellado efectivamente. La desventaja de ello consiste en que todo el lodo que ha sido desplazado hacia la formación deberá ser posteriormente eliminado de los poros de ésta, durante el desarrollo del pozo. Si no es así, el material granular del acuífero permanecerá parcialmente obstruído, dando por resultado un pozo ineficiente.

Es necesario que los perforadores de pozos de agua preparen un fluído de perforación que produzca el efecto del sellado con muy poca invasión dentro de la formación y que, además, no sea muy viscoso como para poderlo bombear con un equipo convencional. Resulta aconsejable usar, en cierta proporción, bentonita de alta calidad, porque en general se obtiene un fluído que desarrolla un sellado efectivo mucho antes de que tenga lugar una invasión extensa.

Cuando se interrumpe la circulación del fluído de perforación para agregar tubería de

perforar o por alguna otra razón, los fragmentos arrastrados por la columna de lodo tienden a devolverse hacia el fondo del agujero. La masa de fragmentos, al sedimentarse muy rápidamente, puede formar puentes sobre los acoples de las herramients y acumularse hasta cierta profundidad por encima del trépano. En estas condiciones, se necesitaría una excesiva presión de la bomba para revolver los fragmentos y reiniciar la circulación: si la masa de partículas no se puede mover, el trépano quedaría prensado en el agujero. Un buen fluído de perforación puede mantener partículas en suspensión, puesto que desarrolla cierta consistencia gelatinosa cuando la circulación se hace más lenta o se detiene. Los lodos de perforación varían ampliamente con relación a sus propiedades para desarrollar una consistencia gelatinosa, pero resulta relativamente fácil proveer un fluido tal, que mantenga en suspensión a la mayor parte de las partículas cuando la circulación dentro del agujero es interrumpida.

La cantidad de agua que puede ser expulsada de las partículas depositadas en la pared del agujero varía de acuerdo con el tipo del arcilla y coloides presente en el lodo. Esta propiedad de perder agua, del fluído y la diferencia de presion en éste, dentro del agujero, influyen en el espesor del filtro que se forma en la pared. Si el agua es expulsada muy rápidamente, se formará un filtro muy grueso que podría interferir al halar y girar la tubería de perforación. La pérdida de agua puede regularse usando lodos adecuados en el fluído.

El enfriamiento y la limpieza del trépano se efectúan mediante los chorros de fluído que son dirigidos a velocidad relativamente alta hacia las caras cortantes y cuerpo del trépano

Un fluído de perforación preparado adecuadamente constituye un lubricante excelente. Los fragmentos y la arena deberán ser retirados con efectividad, conforme el lodo circula por los fosos de sedimentación, para que el fluído pueda realizar su función lubricante.

Control del Lodo de Perforación

Las propiedades de un lodo de perforación que afectan su habilidad para desarrollar sus funciones esenciales en la perforación de pozos de agua, incluyen las siguientes: densidad, viscosidad, consistencia gelatinosa, propiedad filtrante y contenido de arena. Tres de éstas, sean la densidad, viscosidad y contenido de arena, deberán evaluarse en el sitio de la obra para tener una base que permita regular el lodo durante la perforación.

El uso de bentonita de alta calidad, de modo que constituya la porción mayor del contenido de arcilla en el lodo, garantiza que se obtendrá adecuada consistencia gelatinosa y propiedades de filtración lo suficientemente bajas en la mayoría de las perforaciones de pozos. En tal caso, pueden omitirse los ensayos de campo, excepto en situaciones críticas, para valorar estas propiedades.

La densidad del lodo, en términos de alguna unidad conveneional, se determina en el campo utilizando una balanza especial. Este instrumento posee una cápsula en uno de los extremos del brazo y una pesa deslizante en el otro. Cuando la cápsula se halla exactamente llena, su volumen corresponde a una medida dada. A su vez, el brazo de la balanza está calibrado en unidades de peso por volumen. Cuando se encuentra completamente balanceada la cápsula, la posición de la pesa deslizante en el brazo de la balanza indica directamente el peso del fluído o su densidad. En la mayoría de las perforaciones de pozos el peso específico de utilidad es de aproximadamente 1.08 Kg./litro. La retención excesiva de arena en el fluído podría aumentar su peso hasta niveles inconvenientes.

La viscosidad del fluído de perforación se mide en el campo con un embudo de Marsh.

El ensayo se realiza llenando el embudo hasta un nivel determinado (un volumen de 1,500 cm³) y observando el tiempo necesario en segundos para que una cuarta parte del fluído escurra por gravedad desde el embudo. Esta no es una medición real de la viscosidad del fluído de perforación, pero los valores relativos que se obtienen son suficientes para controlar correctamente el lodo cuando los resultados se interpretan a la luz de los de otros ensayos de campo.

El agua indica en el embudo de Marsh una viscosidad equivalente a 26 segundos. Un buen fluído de perforación, con un peso específico de 1.08 Kg./litro, tiene, según el embudo de Marsh, una viscosidad

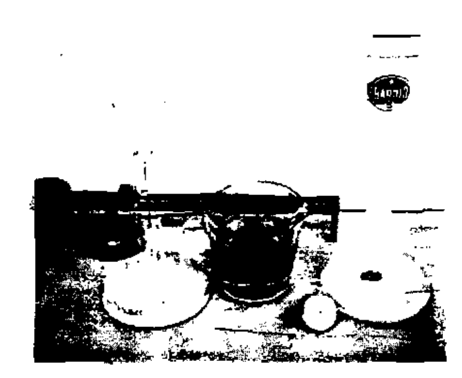


Fig. 177: Al frente se muestran un calibrador del contenido de arena y un embudo de Marsh para medir la viscosidad del lodo. Al fondo aparece una balanza para la determinación del peso específico del lodo.

correspondiente a un rango de 35 a 45 segundos. Si el lodo recoge arena y aumenta su peso específico hasta 1.20 Kg./litro, la viscosidad, según el embudo, será de unos 43 segundos. Cuanto mayor sea la densidad de un lodo que contenga arena, mayor será la viscosidad con que fluye desde el embudo. Contrariamente, cuando el peso del lodo aumenta como resultado de la incorporación de arcilla proveniente de los cortes o fragmentos superficiales, la viscosidad según el embudo de Marsh resulta ser mucho más alta que 43 segundos.

El contenido de arena de un fluído de perforación se mide por volumen y se define como un porcentaje volumétrico. Un volumen determinado de fluído, digamos 100 cm³., se lava dentro de una criba de malla 200. Se realiza el lavado con agua limpia y se tiene cuidado de que a través de la malla pase solamente el fluido de perforación. Las partículas retenidas por la criba se trasvasan cuidadosamente a una probeta cónica graduada. El volumen de arena indicado por las graduaciones de la probeta se expresa entonces como un porcentaje del volumen de la muestra de lodo. Un fluído de perforar de peso y viscosidad adecuados, que contenga menos de un 5 por ciento de arena, generalmente se comporta satisfactoriamente.

Perforación de Circulación Inversa

El método rotatorio de perforación con circulación inversa se efectúa invirtiendo la circulación del fluído de perforar, a diferencia del método rotatorio convencional. El extremo de aspiración de la bomba, en lugar del de descarga, se conecta al vástago giratorio a través del eslabón superior, y de ahí a la tubería de perforación. Esta vez el fluído de perforación con su carga de fragmentos y cortaduras se desplaza hacia arriba por dentro de la tubería y es descargado por la bomba al foso de sedimentación.

El fluído retorna al agujero mediante flujo gravitacional. En esta forma, se desplazará hacia abajo, a través del espacio anular que rodea a la tubería, hasta alcanzar el fondo del agujero, atrapando a su paso fragmentos y cortaduras que vuelven a entrar a la tubería de perforación por las aberturas existentes en el trépano.

El fluído de perforación puede describirse como una agua lodosa más que un lodo de perforar. La arcilla y el limo en suspensión,

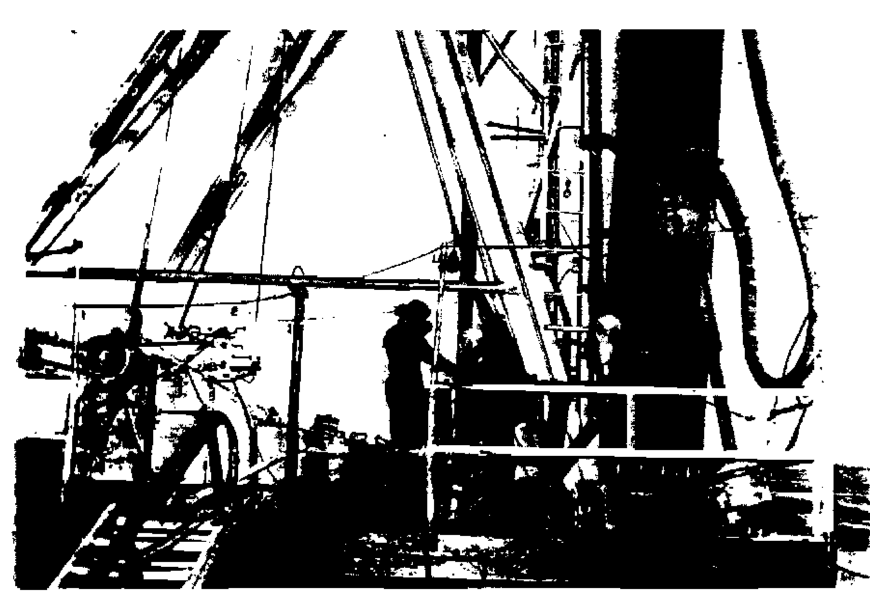


Fig. 178: Perforadora por rotacion, utilizada en la perforación de un pozo de agua de 1,300 m. de profundidad, en el momento de instalar una rejilla Johnson de 70 m. de longitud y de acero inoxidable 304, en Philip, Dakota del Sur. *(Cortesía de United Exploration Co.)*

que recirculan conjuntamente con el fluido, son en su mayoría materiales finos, recogidos en las formaciones subsuperficiales, conforme progresa la perforación. Rara vez se agregan al agua bentonita u otros aditivos, para formar un fluído más viscoso.

Para prevenir la socavación del agujero, el nivel de fluido debe mantenerse a ras del suelo en todo momento. La presión hidrostática de la columna de agua, además de la inercia de la que se desplaza hacia abajo, por fuera de las barras de perforación, mantienen estable la pared del agujero. La erosión de la pared no constituye un problema, puesto que la velocidad del fluido en el espacio anular es baja.

Hay cierta agua que se pierde al emigrar desde el agujero hacia las formaciones permeables que se están penetrando. Algunas de las partículas finas que se hallan en suspensión en el fluido, se infiltran a través de la pared del agujero, produciendo un delgado depósito lodoso que cierra parcialmente los poros y reduce la pérdida de agua. Sin embargo, cuando se está perforando en formaciones arenosas, se necesita disponer de una cantidad considerable de agua en todo momento.

La pérdida de agua puede acaecer súbitamente, y si ello causa que el nivel del fluido descienda por debajo del nivel del terreno, podrían presentarse socavamientos o derrumbes. La pérdida de agua puede aminorarse agregando arcilla al fluído, pero esto se trata de evitar a menos que sea imprescindible. En tales casos bastan unos 75 litros por minuto de agua agregada y, en ocasiones en que la perforación se realiza a través de acuíferos altamente permeables, puede que lleguen a necesitarse hasta 2,000 litros por minuto. La perforación de grava gruesa y seca es la que ofrece las mayores dificultades.

El foso de sedimentación y el de abastecimiento de agua deberán tener un volumen de por lo menos tres veces el del material que habrá de extraerse durante la

perforación. El caudal de circulación de agua que comúnmente se emplea, es del orden de unos 1,900 litros por minuto.

Se utiliza una bomba centrífuga con pasajes grandes para que las cortaduras no se atasquen adentro. Cierto tipo de equipo emplea un eductor que funciona como una gran bomba de eyector o de chorro, el cual evita el que las cortaduras y fragmentos tengan que pasar a través de la bomba centrífuga. El límite de aspiración de la bomba hace que se tengan que utilizar tramos de tubería de 3 m. de largo. Por lo general, se usan tubos de 15 cm. de diámetro, de modo que aquellos cantos de hasta unos 12.5 cm. de diámetro pueden ser extraídos por dentro de la tubería. Los acoples que se utilizan para los tubos son del tipo de brida.

Puesto que el diámetro de las bridas de acople es de unos 28 cm., el menor agujero que podría perforarse es prácticamente de unos 45 cm. de diámetro, apenas el necesario para proveer suficiente espacio anular a la altura de cada acople de brida.

Con este sistema, se pueden perforar agujeros de hasta 1.50 mts. de diámetro. El diámetro del agujero debe ser grande en comparación con la tubería de perforar para que la velocidad descendente del agua sea lenta. Se recomienda que la velocidad de descenso del agua sea del orden de unos 30 centímetros por segundo.

Tanto el trépano como la tubería de perforación se hacen girar a velocidades angulares que varían entre 10 y 40 revoluciones por minuto.

La circulación inversa proporciona el

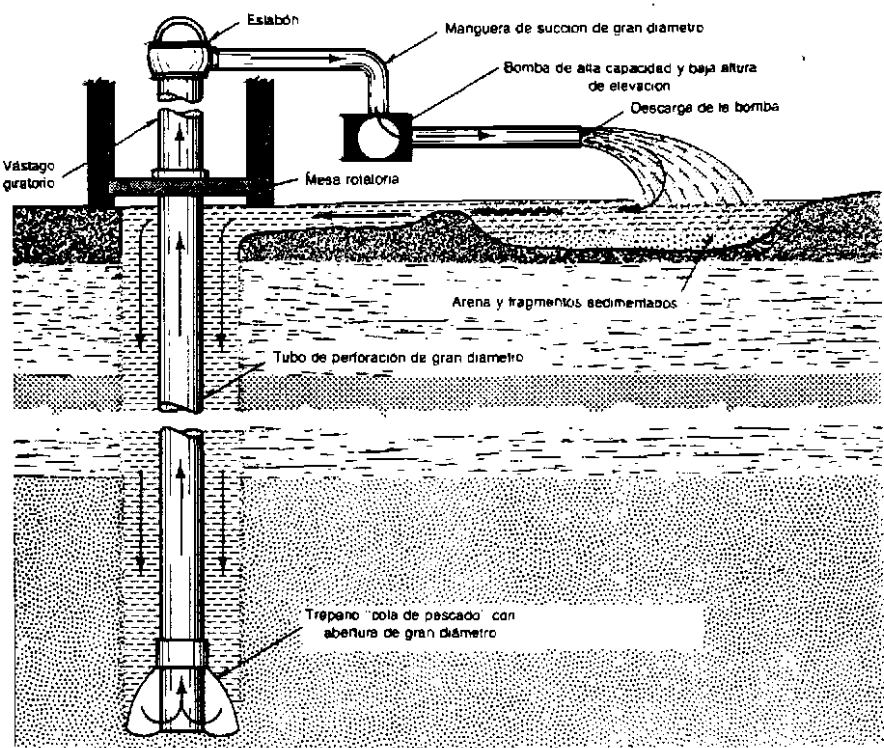


Fig. 179: El diagrama esquemático muestra los principios básicos del método rotatorio de perforación por circulación inversa. Las cortaduras y fragmentos son levantados por un flujo ascendente a través de la tubería de perforar.

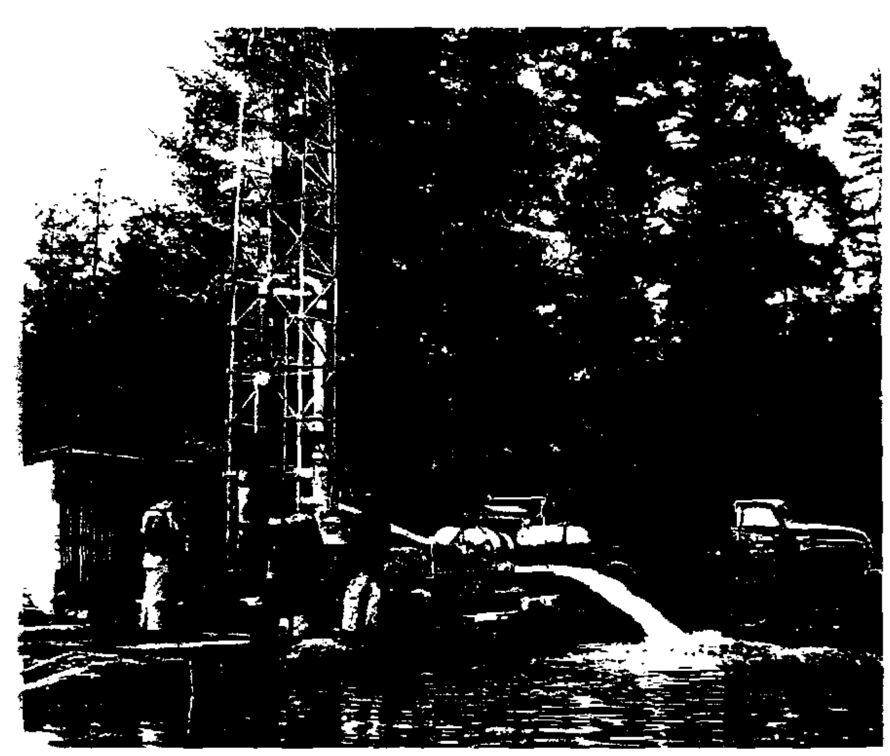


Fig. 180: Maquina de perforacion por circulación inversa, perforando un pozo de 75 cm. para del Distrito Hidráulico de Lakewood, en Tacoma, Washington. Este pozo fue completado con una Rejilla Johnson Everdur, de 56 cm. y un filtro artificial de grava.

método más económico para perforar en diámetros grandes, formaciones suaves y no consolidadas. Cuando las condiciones geológicas son favorables, el costo por metro, de agujero, aumenta poco con el incremento del diámetro. El costo de perforación de un hoyo de 0.90 mm. ó 1.00 m. de diámetro es apenas ligeramente mayor que el de uno de 0.60 m.

En consecuencia, la mayor parte de los agujeros perforados por este método son de unos 0.60 m. de diámetro o mayores, circunstancia tal que favorece el acabado de los pozos mediante la colacación de filtros artificiales de grava. Este es un caso en donde el diseño de un filtro artificial de grava depende en su mayor parte de los factores peculiares del método específico de perforación.

Las condiciones en que resulta favorable el uso del método de circulación inversa, son tales como: presencia de formaciones de limo y arena o de arcilla suave; ausencia de arcilla o de cantos rodados; nivel estático del agua a unos 3 metros o más por debajo de la superficie. Las que lo limitan, consisten en: nivel estático muy elevado; falta de abastecimiento de agua para compensar la pérdida de fluído de perforación; formaciones rígidas de arcilla o lutita y la existencia de gran cantidad de guijarros o cantos.

Aquellos guijarros o cantos de un tamaño mayor que el de la tubería de perforación o que las aberturas del trépano, no pueden ser extraídos durante la perforación. Los trépanos que se utilizan no están en capacidad de fracturar los guijarros; tan

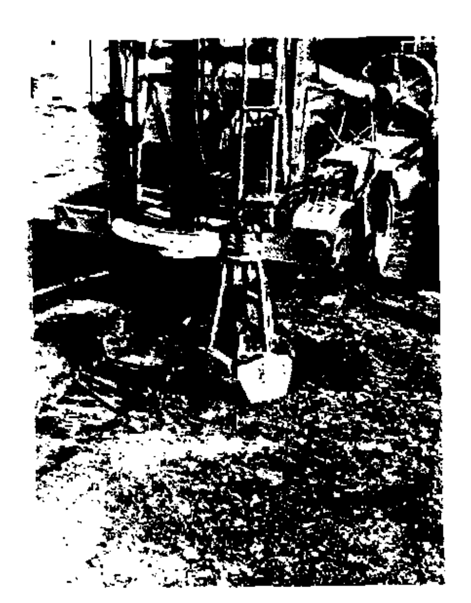


Fig. 181: Cucharon que se utiliza para extraer los guijarros del fondo de un agujero en que éstos no pueden ser levantados por la bomba, a través de la tubería de perforación.

pronto como algunos de éstos se acumulan en el fondo del agujero, la perforación se paraliza. La tubería de perforación y el trépano deben ser alzados periódicamente y los cantos extraídos mediante un cucharón especial para que la perforación pueda continuar normalmente.

Este método no tiende a formar una camada filtrante en la pared del agujero igual a la que se necesita cuando se está perforando por el sistema rotatorio a base de lodo. La liviana película que se forma y que evita la pérdida excesiva de fluído de perforación, es eliminada más fácilmente al desarrollar el pozo, que el filtro gelatinoso del método convencional rotatorio.

Perforación a Chorro

Existen dos métodos para construir pozos, en los que la operación se caracteriza por el empleo de un chorro de agua a presión. Uno de los métodos podría describirse como sistema de percusión a chorro. Hasta el presente su utilización se ha visto limitada en gran parte a perforar pozos de 7.5 y 10 cm. hasta profundidades de alrededor de 60 m. Mediante este procedimiento se han taladrado pozos de hasta 300 m. de profundidad, pero para estos casos otros sistemas lo han desplazado.

Las herramientas de perforación del método de percusión a chorro consisten de un trépano de forma de cincel fijado al extremo inferior de una sarta de tubería. Unos agujeros practicados en cada lado de la aleta del trépano sirven como boquillas para dar paso a los chorros de agua que mantienen limpio el trépano y ayudan a aflojar el material que se va perforando.

Al mismo tiempo se debe bombear agua a presiones que van desde moderadas a altas y a través de la tubería de perforar, la cual escapa por los agujeros del trépano. El agua de perforación fluye luego en forma ascendente por el espacio anular que se encuentra alrededor de la tubería de perforación, arrastando así los fragmentos en suspensión. El agua descarga en la superficie del terreno y de ahí es conducida a uno o más fosos en donde las partículas o cortaduras sedimentan. Desde aquí, el agua es de nuevo aspirada por la bomba y recirculada a través de la tubería.

La descarga de la bomba se hace a través de una manguera de presión y de un eslabón giratorio conectado al extremo superior de la tubería. Las barras de perforación son luego obligadas a girar manualmente, para hacer que el trépano corte un agujero circular. El sistema de circulación del fluído es similar al que se emplea en el método de rotación convencional.

En tanto se mantiene la circulación de agua, las barras de perforar, conjuntamente con el trépano, se hacen subir y bajar de una manera similar a la del sistema de percusión, pero con carreras más cortas. La acción cortante del trépano, combinada con la de los chorros de agua, taladra el agujero.

El ademe, acondicionado con una zapata

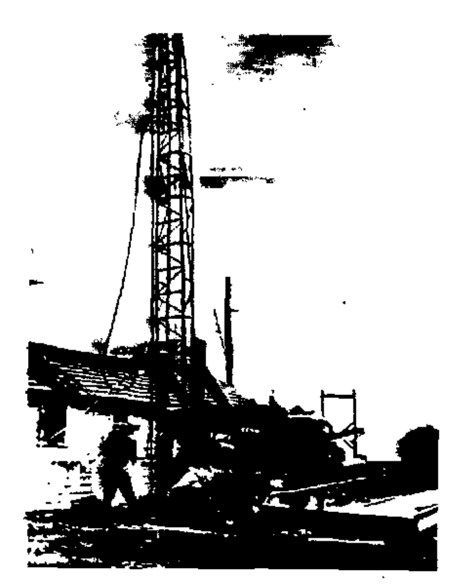


Fig. 182: Empleo del metodo de chorro de agua en la perforacion de un pozo rural de pequeño diametro y de 37 m. de profundidad.

de hincado, se va hundiendo normalmente conforme prosigue la perforación. La tubería es hincada mediante el uso de un bloque o pesa que puede fijarse al extremo superior de la sarta de ademe.

Si se agrega bentonita al agua, hasta formar un lodo liviano de perforación, se pueden perforar pozos a agujero abierto hasta profundidades limitadas, por el método de percusión a chorro. Sin embargo, cuando el agujero no ademado tiende a derrumbarse, deberá utilizarse una tubería de ademe que siga muy de cerca al trépano cuando se está trabajando. El sistema de percusión a chorro puede usarse para la penetración de algunas formaciones constituídas por arenisca o esquistos, que no sean muy duras. El principal uso que se le da es el de la perforación de pozos de pequeño diámetro en arenas acuíferas.

Los tubos de pequeño diámetro y las punteras con el extremo inferior abierto, pueden hacerse penetrar dentro de formaciones arenosas mediante la sola acción de lavado de un chorro de agua sin necesidad de utilizar ningún tipo de herramienta de perforación. Este procedimiento se describe en detalle en el Capítulo 13 en conexión con la instalación de punteras.

Método de Percusión Hidráulica

Este procedimiento de perforación, a menudo denominado el método de la barra hueca, hace uso de una sarta de tubería de perforación o de barras similares a las que se utilizan en el sistema de percusión a chorro. El trépano es también similar, excepto que se halla provisto de una válvula de retención de bola, intercalada entre el trépano y el extremo inferior de la tubería de perforación. Desde la superficie se inyecta agua por el

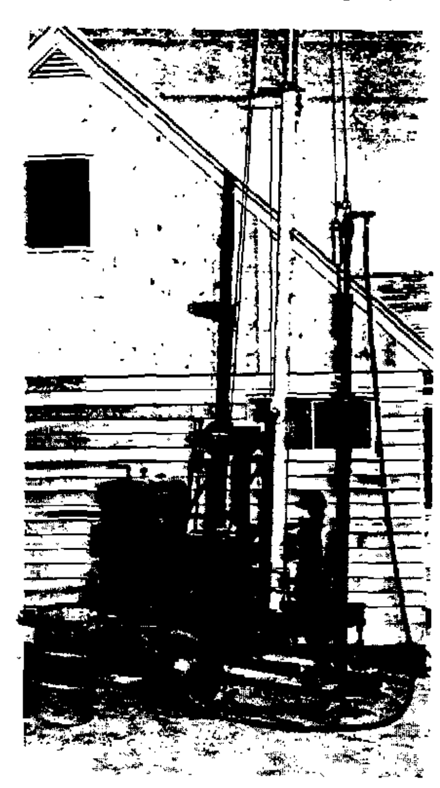


Fig. 183: Perforación de un pozo por el método de percusión a chorro. Se ha utilizado en este caso un bloque de hincado para hacer penetrar el ademe, conforme avanza la perforación.

espacio anular comprendido entre las barras de perforación y el ademe del pozo, para así mantener el agujero lleno de agua todo el tiempo.

La perforación se ejecuta levantando y dejando caer conjuntamente las barras y el trépano mediante carreras cortas y súbitas. Conforme el trépano cae y golpea en el fondo, el agua que contiene en suspensión los fragmentos o cortaduras hace su entrada a través de los orificios del trépano. Cuando éste es halado, la válvula de retención se cierra y atrapa al fluído contenido en ella. Este movimiento alterno continuo produce una acción de bombeo que eleva el fluído hasta el extremo superior de la sarta de tubería de perforación, de donde descarga a un tanque de sedimentación.

El agua se hace retornar desde el tanque de sedimentación al agujero, completando así el ciclo de circulación del fluído, lo que tiene lugar en dirección inversa a la del método de chorro. No se necesita esta vez ninguna presión de bombeo, por lo que la maquina de perforar a percusión se adapta muy bien al sistema.

El ademe se hace descender conforme la perforación continúa. Por lo general, se fija o amordaza una pesa de hincado a las barras de perforación; y con este peso adherido, las barras son levantadas y dejadas caer de modo que el peso golpee sobre el extremo superior de la tubería.

Las ventajas del método consisten en que se requiere el mínimo de equipo y que fácilmente se pueden obtener muestras de buena calidad de las formaciones que se van penetrando. Sin embargo, su utilización queda restringida solamente a la perforación de pozos de pequeño diámetro y a través de formaciones arcillosas y de arena que se hallen relativamente libres de guijarros o cantos.

Perforación con Taladro

El método más generalizado de taladrar un pozo comprende la excavación del material, para lograr la profundidad del hoyo, mediante el uso de un taladro. El método queda muy bien definido por el término de perforación rotatoria con taladro.

El material que se va excavando se recoge en un cubo o cucharon cilíndrico que se halla dotado, en el fondo, de unas cuchillas cortantes, como en un taladro. El cucharón se conecta al extremo inferior de un vástago giratorio, el cual pasa a través de un gran engranaje anular, el que a su vez le imprime el movimiento de rotación como si fuese la mesa rotatoria.

El vástago giratorio (kelly) es de sección transversal cuadrada. A menudo éste consiste de dos tramos de tubo cuadrado, estando un tramo dentro del otro en forma telescópica. El acondicionamiento anterior permite taladrar hasta una profundidad de casi el doble de la del vástago giratorio, antes de tener que agregar otro tramo de barra de perforación entre el vástago y el cucharón. Al perforar, utilizando solamente el vástago telescópico como barra de perforación, el cucharón se extrae del hoyo y se vacia sin desconectarlo. Si se necesita usar una o más barras de perforación para



Fig. 184: Uso del cabrestante para subir y dejar caer las barras de perforación cuando se aplica el método de percusión hidráulica.

profundizar la excavación, habrá que desacoplar la barras cada vez que se trae el cucharón a la superficie.

Este sistema de perforación de pozos ha encontrado aplicación ante todo en aquellos lugares en que las formaciones arcillosas permanecen sin derrumbar hasta que se instale la tubería que servirá de ademe. Resulta difícil perforar en arena que se encuentre por debajo de la superficie freática, pero recientemente se ha encontrado que si el hueco se mantiene lleno de agua todo el tiempo, se pueden vencer algunas de estas dificultades. Si la arena de la formación es muy permeable, se necesitaría un gran abastecimiento de agua. En condiciones favorables, la perforación o taladrado avanza rápidamente, por lo que la demanda máxima de agua sólo dura unas pocas horas.

Los guijarros y los cantos causan muchas



Fig. 185: Para hacer funcionar el cucharón rotatorio al taladrar un agujero abierto, se utilizan un engranaje anular grande y un vástago giratorio, en la máquina de taladrar. *Cortesía de Colweld Division*

dificultades. Estos deben extraerse del fondo del hueco mediante herramientas tales como una cuchara de pesca, tenazas o agarraderas, para poder continuar la perforación con el cucharón rotatorio. El diámetro del hueco debe ser lo suficientemente grande para dar acceso a estas herramientas cuando sea necesario.

El segundo método de taladrado se lleva a cabo mediante el uso de un taladro espiral continuo y abierto. El vástago del taladro es movido mediante un cabezote rotatorio de hincado, acoplado a un mecanismo hidráulico que lo levanta y lo baja. Los tramos individuales del vástago del taladro son de alrededor de 1.50 m. de longitud. El diámetro del taladro varía de 10 a 15 centímetros.

Este método de taladrar está restringido a perforar en formaciones que contengan suficiente arcilla, de modo que el hueco se mantenga sin derrumbar, al menos por un tiempo. Cuando el taladro encuentra arena saturada, la espiral ya no puede arrastrar material hacia arriba, por lo que la perforación no puede ser llevada por debajo de la superficie freática. Los pozos someros se pueden construir, taladrando por este sistema hasta el nivel superior del acuífero, haciendo descender dentro del hueco tubería de pequeño diámetro y hundiendo ésta dentro de la arena saturada, mediante cuchareo o por la acción de un chorro de agua.

Perforación Rotatoria con Aire Comprimido

El equipo rotatorio de perforación, que utiliza aire comprimido como fluído de perforar, en lugar de lodo, constituye un avance muy moderno en la industria de perforación de pozos. En este sistema, se hace circular aire a presión por la tubería de perforación, el cual escapa por las aberturas del trépano, subiendo luego por el espacio anular que rodea a la tubería. El aire que se desplaza a gran velocidad dentro del anillo,

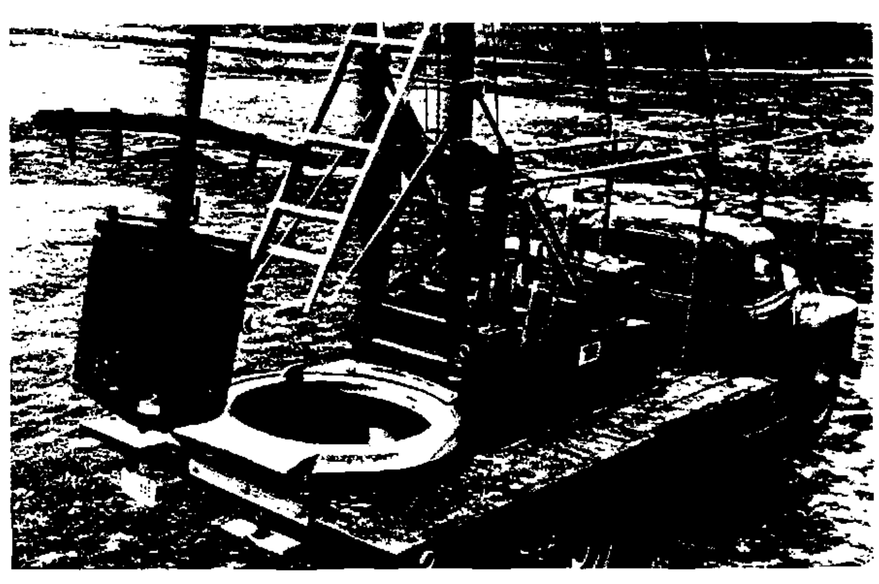


Fig. 186: Cuando ya se encuentra cargado de material, el taladro de cucharón es llevado por sobre el engranaje anular y hecho a un lado para vaciarlo. *(Cortesía de Gus Pech Mfg. Co., Inc*

arrastra los fragmentos hasta la superficie o los expulsa de las fisuras de la roca.

Este procedimiento sólo se puede aplicar a formaciones consolidadas. Las máquinas de perforar rotatorias diseñadas para este tipo de trabajo, vienen por lo general equipadas con una bomba convencional de lodo además de un compresor de aire de gran capacidad. El lodo de perforar puede también utilizarse cuando se esta perforando dentro de materiales derrumbables que se hallen sobre el basamento. Posteriormente, la perforación puede proseguir dentro de la roca, utilizando aire. Es posible que, para evitar derrumbes, se haga necesario instalar ademe por dentro del relleno superior, al pasar a circulación de aire.

Los trépanos para roca, del tipo de rodetes, similares a los que se diseñan para la perforación a base de lodo, pueden también utilizarse cuando se perfora con aire. El tipo que se conoce como trépano incrustado resulta de conveniente aplicación a ciertas áreas. Este trépano se fabrica con incrustaciones de carburo de tungsteno fijadas a la periferia de los rodetes de acero. Los trépanos tricono en diámetros de alrededor de 30 cm., también se utilizan corrientemente. Asimismo, se dispone de diámetros mayores.

Los ensayos de campo que se han realizado para determinar el comportamiento de estos trépanos, han demostrado que cuando se utiliza aire comprimido en lugar del lodo de perforación, la velocidad de penetración es a menudo mayor, lo mismo que la duración del trépano. Los ensayos de laboratorio al perforar en calizas, corroboran lo anteriormente expuesto. Posiblemente la mejor limpieza del fondo que se obtiene con el procedimiento es la que causa un mejor comportamiento. Sin embargo, algunas otras experiencias demuestran que, si mucha agua ingresa al pozo cuando se está penetrando dentro de una formación acuífera, la velocidad de penetración no es mayor de la que se obtendría si se perforase con lodo.

El otro tipo de herramienta y trépano, que se utiliza en el sistema rotatorio con aire

comprimido, consiste en esencia de un martinete neumático que se halla colocado en el extremo inferior de la tubería. Este combina el efecto percusivo de la perforación con herramientas de cable, con la acción rotatoria de los equipos respectivos. Esta herramienta bien podría denominarse martinete descendente.

El trépano consiste de un martinete con *incrustaciones* resistentes de earburo de tungsteno, que son las que proveen las superficies de corte. El carburo de tungsteno es *extremadamente* resistente a la abrasión, pero los trépanos siempre se desgastan por el uso continuado. Las incrustaciones pueden afilarse mediante esmerilado cuando las condiciones de operación indican que el trépano ya no está cortando adecuadamente.

La velocidad de penetración, en diversas rocas, es mayor que cuando se utilizan otros métodos y otros tipos de herramientas. Hasta ahora, los trépanos de gran diámetro no han resultado prácticos. El máximo tamaño que corrientemente se utiliza es el de 15 cm., aunque también se dispone del tamaño de 20 cm.

El aire comprimido deberá suministrarse a una presión de 7 a 7.7 Kg/cm². Algunas

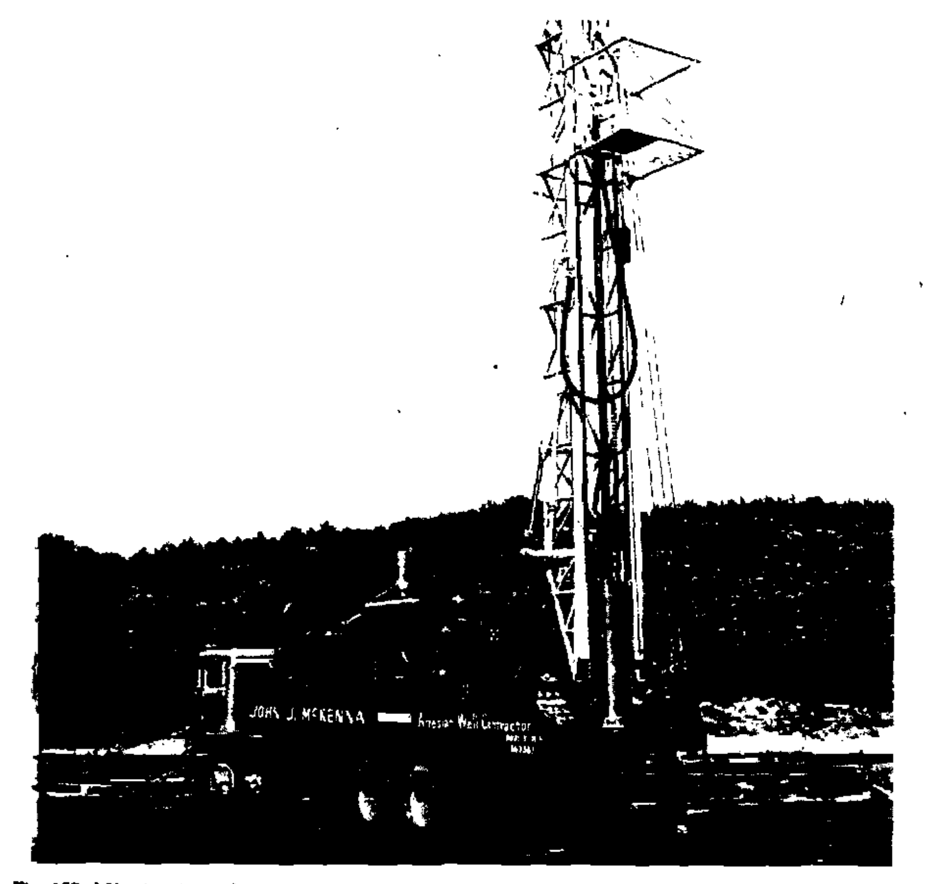


Fig. 187: Máquina de perforación rotatoria, dotada de un compresor de alta capacidad, para perforar con aire a baja o alta presión, dependiendo del tipo de trépano o herramienta que se use. La máquina tiene también una bomba de lodo, para utilizar, cuando se necesite, la circulacion de fluido.

(Cortesía de Sullivan-Chapman Sales, Inc.)



Fig. 188: Trépano utilizado como martinete neumático. El piston movido por aire comprimido produce un rápido golpeteo en la parte superior del trépano; las superficies con incrustaciones de carburo de tungsteno, cortan y desmoronan los materiales de la formación.

herramientas necesitan hasta 14 Kg/cm². Para extraer los fragmentos con efectividad, la velocidad ascendente del aire, dentro del espacio anular que se halla por fuera de la tubería de perforar, deberá ser de unos 900 m/min. o mayor. Al perforar agujeros de 10 cm. de diámetro, el abastecimiento de aire libre deberá ser de por lo menos 170 m³/h. La velocidad apropiada de rotación es de 10 a 30 revoluciones por minuto, siendo preferible una velocidad reducida, en las rocas más duras y más abrasivas.

El costo por metro de perforación con este sistema se halla influido en forma muy sensible por la duración y costo de los trépanos. Al escoger el tipo de trépano que produzca los resultados más económicos se debe tener en cuenta la experiencia local y los tipos de rocas consolidadas que se vayan a perforar.

Una de las ventajas prácticas de la perforación de pozos domiciliarios por este método, consiste en que el perforador puede observar, conforme avanza la perforación, cuánta agua es expulsada del pozo junto con los fragmentos. En esta forma, estará en capacidad de juzgar si el pozo ha alcanzado la suficiente profundidad como para producir el rendimiento que se desea obtener. De otra manera, el rendimiento debería ser estimado mediante una prueba de cuchara. Hay economía de tiempo cuando se omite la prueba de cuchara.

Pozos Hincados o (Clavados)

Los pozos elavados o hincados, solamente pueden construirse en formaciones suaves que se encuentren relativamente libres de guijarros o de cantos. Estos pozos se hincan por lo general hasta profundidades de 15 metros y aún mayores, cuando las condiciones son favorables.

Los pozos clavados son bombeados por lo general utilizando la presión atmosférica. En tales casos, el nivel estático debe hallarse a una profundidad no mayor de unos 4.5 metros por debajo de la superficie. Si se utiliza tubería de 5 centímetros o mayor, se pueden usar ciertos tipos de bomba, tales como la de eyector o chorro, o la de cilindro, para bombear agua desde profundidades mayores.

Para lograr una buena instalación, se requiere usar el equipo adecuado. No existen sustitutos de una buena máquina y de las herramientas especiales, si éstas se mantienen en optimas condiciones de trabajo.

Las punteras pueden clavarse o hincarse desde la superficie del terreno hasta profundidades de 9 mts. mediante métodos manuales, dependiendo de la compacidad del suelo. Ya sea que el hincado se efectúe a mano o mediante una máquina, el primer

paso consiste en abrir un agujero, con taladro manual, de una profundidad ligeramente mayor que la longitud de la puntera. Este agujero deberá ser vertical y llevarse a tanta profundidad como sea posible. Luego, se arma una sarta constituída por la puntera y uno o más tramos de tubería de extensión de 1.5 metros de longitud cada uno. Los

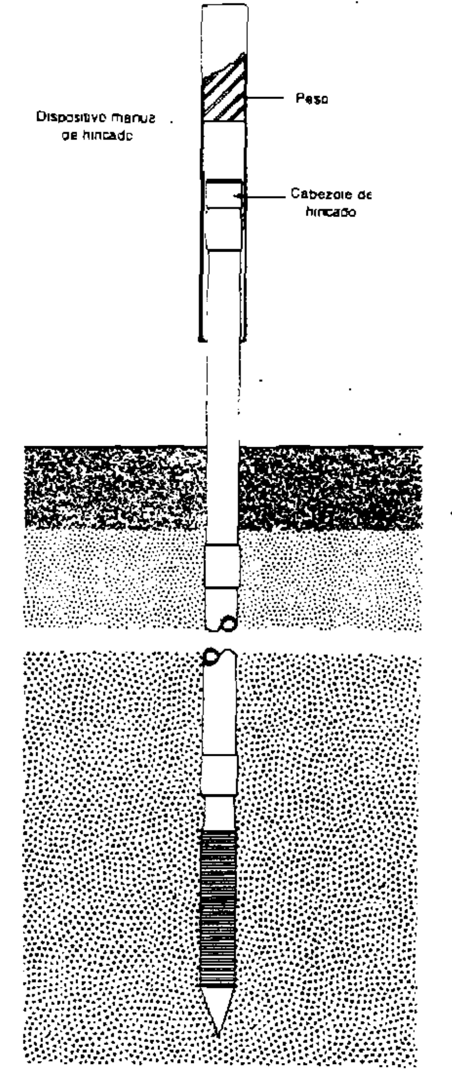


Fig. 189: Herramienta sencilla para hincar punteras hasta profundidades de 7.5 a 10 m.

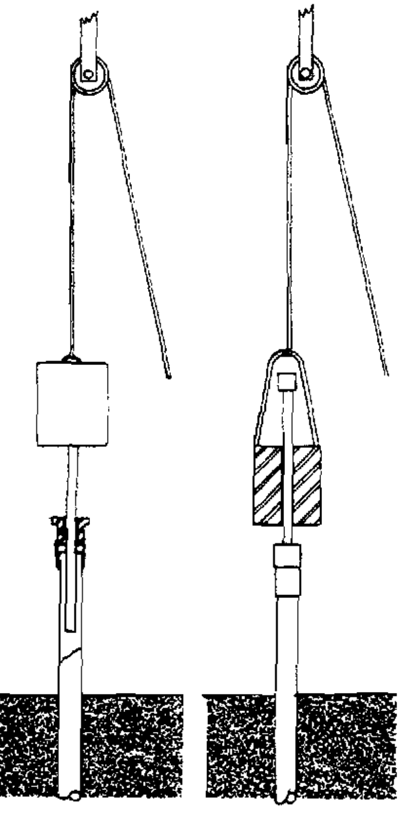


Fig. 190: Disposicion de un bloque más pesado de hincado, operado generalmente por medio de una maquina de perforación o con una asa.

acoples deben tener extremos rebajados y roscas cónicas o ahusadas para proporcionar conexiones más resistentes que los acoples ordinarios de plomería. Debe aplicarse a las roscas algún compuesto que haga las uniones a prueba de entrada de aire. Cuando ya está preparado, el conjunto de punteras y tubería de extensión se introduce en el agujero previamente taladrado. Se enrosca luego un cabezote de hincado, de hierro maleable, al extremo superior de la sarta, y se da comienzo al proceso de clavado.

El hincado manual se realiza mejor con el tipo de equipo que se ilustra con las Fig. 189 y 190. Uno de estos es una herramienta parecida a la que se utiliza en el hincado de postes para vallas. Puede ser manejado por uno o dos hombres, dependiendo del peso. El hincado también puede hacerse con un pesado mazo, pero esto no se recomienda. Resulta difícil proporcionar golpes rectos y sólidos con un mazo: los golpes desviados podrían quebrar o torcer la tubería. No importa el método que se utilice, la tubería de extensión deberá estar cuidadosamente guiada para asegurarse de que el pozo sea vertical.

Las herramientas de hincado pueden suspenderse de un trípode o torre. El artefacto para hincar debe hallarse suspendido directamente sobre el centro del pozo, para que pueda aplicar golpes rectos. El peso de estas herramientas debe ser del orden de 35 a 40 Kg. Los pesos mayores son más eficientes y por lo general se manejan con una máquina liviana de perforación de pozos. La acción excéntrica de una máquina de perforar por percusión, se adapta maravillosamente para un hincado rápido con herramientas de este tipo.

Para asegurarse de que los acoples roscados permanezcan apretados, se le imprime a la tubería de vez en cuando, un movimiento de enroscado con una llave, pero teniendo cuidado de no torcerla severamente. El torcerla no ayudaría al hincado de la puntera y podría dañarla. La llave sólo debe usarse para darle un pequeño ajuste a las uniones roscadas.

Voladura de Cantos

"Hemos estado haciendo un buen metraje, hasta que tropezamos con esos cantos . . ." Esta es la historia de la experiencia corriente en la perforación de pozos. No importa cuál sea el método que se utilice, los cantos o grandes guijarros con que se tropieza a casi cualquier profundidad, retrasan el trabajo y aumentan los costos de perforación.

La voladura con dinamita, para reventar las rocas que producen la obstrucción, es la manera usual de afrontar la situación. El procedimiento varia dependiendo de que se esté usando el método de percusión o el de rotación. En los siguientes párrafos se describen dos procedimientos que son aplicables a cada método en particular.

El primer procedimiento supone que se ha introducido, por el método de percusión, un ademe de 30 cm. o más grande, hasta una profundidad en donde los guijarros o cantos impiden que la perforación pueda continuar. Estas grandes piedras no se pueden fracturar con el impacto producido por el barreno: deben emplearse explosivos.

Para colocar la carga explosiva, se hace descender por dentro del ademe más grande, una sarta de tubería de 20 cm. de diámetro, dotada de guías centradoras. La guía centradora inferior debe fijarse a unos 3 m. o más por sobre el extremo inferior del tubo de 20 cm. Esto le permite al tubo que se está introduciendo, penetrar, si es posible, unos 3 m. dentro del nido de piedras.

Seguidamente se da comienzo a la perforación, con herramientas de 20 cm. La tubería de 20 cm. se hinca tan profundamente como sea posible. Si ésta está descansando sobre un canto muy grande, deberá perforarse en éste un agujero abierto.

El explosivo debe colocarse en el fondo del agujero de 20 cm. y cubrirse con unos 90 cm. de arena. Enseguida, y si ello es posible, el agujero deberá llenarse de agua, evitando así que la formación trate de ascender conforme la tubería de 20 cm. es halada hacia arriba. Esta tubería deberá ser levantada por lo menos 1.50 m. para protegerla.

Si el explosivo puede colocarse bien profundamente por debajo del extremo del ademe grande, entonces no será necesario halar el tubo hacia arriba para protegerlo. El objectivo que se persigue es el de despedazar suficientemente las piedras para que las herramientas de perforación realicen el resto de la labor, de modo que el ademe de

diámetro mayor pueda ser hincado a través del material fracturado.

Para detonar la carga explosiva, deberán utilizarse siempre detonadores eléctricos. Los cables, desde luego, deberán mantenerse sobre la superficie del terreno, sin ejercer tensión alguna, para que no se dañen mientras se levanta la tubería. Poniéndolos en tensión, el operador puede saber si los explosivos permanecen en su lugar.

Después de hacer detonar la carga, los cables son retirados del agujero. Si se desea, puede hacerse descender de nuevo el tubo de 20 cm. para asegurarse de que ha habido suficiente desmoronamiento como para permitirle al ademe grande ser hincado.

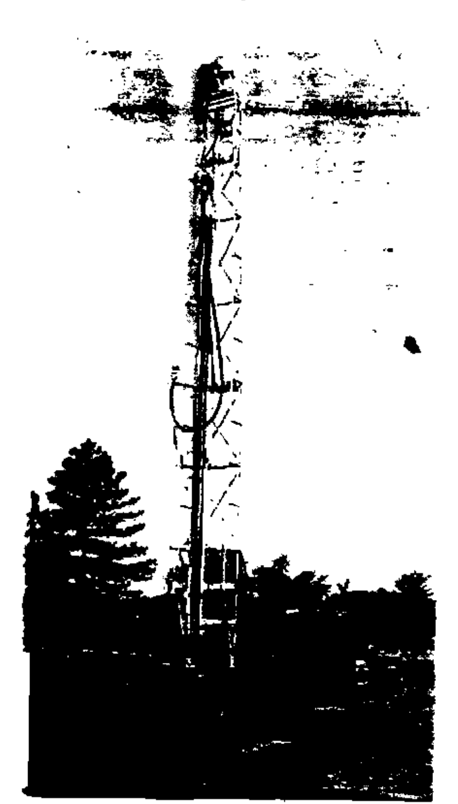


Fig. 191: Máquina perforadora combinada de rotación y percusión.
(Cortesía de Sanderson-Cyclone Co.)

Cuando se sabe que el ademe grande puede bajarse hasta una profundidad mayor, se retira la tubería de 20 cm. y la perforación puede proseguir usando las herramientas de mayor tamaño.

Es difícil establecer reglas específicas para determinar el tamaño de la carga explosiva. La cantidad que se necesita para realizar el trabajo adecuadamente depende de varios factores: características generales de la formación, tamaño de los cantos, composición de los mismos, profundidad del agujero y diámetro del pozo que se pretende construir.

Muchos perforadores usan un método de tanteo. Utilizan una carga de tamaño moderado y si observan que resulta muy pequeña, repiten la operación con una carga mayor. Un operador que tenga experiencia local puede a menudo discernir la cantidad apropiada que debe usarse.

Resulta virtualmente imposible que el uso de una carga pequeña pueda causar problemas serios. Todo lo que podría suceder es que habría que repetir la operación para llegar a los resultados que se desean. Si al principio se utiliza una carga excesiva, se podría dañar el ademe y la formación se desmoronaría más de lo necesario para proseguir con la perforación.

Las mediciones precisas son importantes. El perforador debe conocer exactamente la profundidad del agujero que se ha perforado, la longitud de ademe que se haya introducido en éste y la profundidad de colocación de la carga explosiva.

En aquellas situaciones en que una previa experiencia indica la existencia de cantos, es mejor volar éstos antes de comenzar la construcción del pozo permanente. Para lograrlo, se perfora primero un agujero piloto a fin de poder efectuar la voladura a la profundidad en que se hallan los cantos.

El agujero piloto debe ser de un diámetro de 20 cm. Ello se basa en el hecho de que una sarta de herramientas de percusión de 20 cm. (8 pulgadas) brinda la relación más alta

entre el peso y diámetro de agujero, y las herramientas están fabricadas con el tamaño óptimo de acople para perforación pesada en roca. La tubería de 20 cm. tiene alta resistencia y provee un buen espacio de trabajo.

El pozo piloto de 20 cm. se perfora hasta que encuentre los cantos. La perforación debe continuarse tan profundamente como sea posible dentro del lecho de piedras; si se encuentra un canto muy grande, deberá perforarse un agujero abierto dentro de éste.

La carga explosiva deberá situarse tan retirada del extremo inferior del tubo de 20 cm. como las condiciones lo permitan. Si no se puede perforar ningún agujero abierto por debajo de la tubería, la carga deberá colocarse dentro de ésta y el tubo halarse

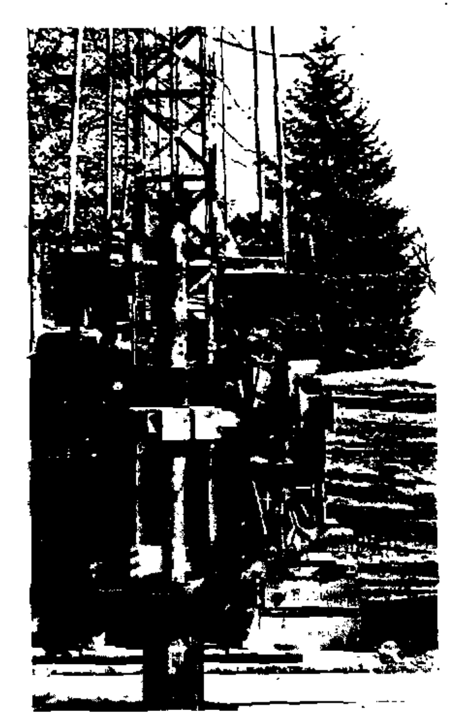


Fig. 192: Esta disposición para halar tubería utiliza efectivamente los golpes hacia arriba proporcionados por las herramientas de percusión, cuando se está extrayendo tubería.
(Cortesía de Dumbar Drilling, Inc.)

hacia arriba después de haber cubierto la carga con unos 0.90 ó 1.20 m. de arena fina y llenado el agujero con agua.

Una vez que la carga ha sido detonada, podrá continuarse con la perforación del pozo exploratorio de 20 cm. para determinar si se produjo suficiente desmoronamiento como para permitir la perforación del pozo permanente, en el diámetro que se desea. Si se tropieza con cantos adicionales conforme el tubo de 20 cm. se va hincando a mayor profundidad, deberán efectuarse explosiones adicionales.

Procedimientos cuando se utiliza perforación rotatoria. Cuando se está perforando por el método de perforación rotatoria y se tropieza con cantos que el trépano no puede penetrar, se debe instalar una sarta de tubería como preparación de la voladura de los cantos. Luego se introduce por dentro de la tubería un trépano de tamaño adecuado, para intentar perforar por debajo del extremo del tubo.

Se debe preparar a continuación una cantidad reducida de fluido de perforar, tan viscoso como lo permita la bomba de lodo. Debe introducirse dentro del agujero una suficiente cantidad de este lodo para llenar por lo menos unos 3 m. del fondo. Con el fluido pesado ya colocado en su sitio, se prosigue con la perforación, agregando suficiente peso al trépano para lograr penetración, pero usando una rotación muy lenta.

La bomba no debe mantenerse funcionando contínuamente; unos cuantos desplazamientos por metro de penetración.

Edward E. Johnson, Inc., en ningún momento garantiza los resultados, y desconoce toda responsabilidad en relación con la información y precauciones que se han dado al describir los métodos anteriores. Además, debe entenderse que no todos los procedimientos aceptados para lograr seguridad, han sido descritos aquí y que en ciertas circunstancias podría ser necesario tomar precauciones adicionales. Las sugerencias que se han dado no modifican en ningún momento ningún requisito estatal, municipal, federal o de aseguradoras, o de códigos referentes a las voladuras o explosiones.

son suficientes. Limitando la circulación durante está operación, se evita cualquier acción de chorro por parte del lodo de perforación. No es necesario levantar los fragmentos o cortaduras hasta las superficie, puesto que el lodo pesado las puede mantener en suspensión. Uno de los objetivos que se buscan es el de formar una matriz viscosa para mantener los fragmentos de roca embebidos en la pared del agujero mientras el trepano desciende y va desplazando algunos de aquéllos.

Cuando se ha perforado un agujero suficientemente grande como para permitir la colocación de la carga explosiva por debajo de la tubería ésta puede acomodarse y detonarse en la misma forma descrita para el caso de la percusión.

Si apareciera un canto muy grande, será necesario perforar un agujero dentro del canto mismo para colocar la carga explosiva. En algunos casos podría resultar más económico perforar este agujero con una broca de diamante, si tal herramienta se encuentra disponible.

El ademe provisional que se halla dentro del agujero puede halarse hacia arriba en una distancia suficiente para evitar el daño que podría sufrir al detonar la carga. La tubería de perforación y el trépano deberán retirarse del agujero antes de asentar la carga.

Si en un sitio particular se prevee la existencia de cantos, resulta a menudo mejor adoptar un procedimiento alterno, que consiste en perforar un agujero piloto antes de dar comienzo al pozo permanente. Con ello se logran dos propósitos. La perforación exploratoria revela el carácter de los materiales del subsuelo y la profundidad a que se halla el canto. El otro propósito es, desde luego, el de permitir asentar la carga explosiva a la profundidad apropiada para desmoronar los cantos.

El agujero de menor diámetro deberá perforarse hasta que se encuentren los cantos. La perforación dentro del nido de cantos podrá realizarse conforme se describió antes en relación con el procedimiento anterior. En algunos casos, es posible perforar suficientemente profundo, para colocar la carga explosiva sin necesidad de hacer bajar una sarta de ademe provisional, dentro del agujero. Cuándo ha de necesitarse ademe provisional, es algo que deberá decidirse en cada caso particular conforme a las condiciones del trabajo.

Una vez que la explosión ha sido realizada, el agujero de exploración puede profundizarse o se puede dar comienzo a la perforación del pozo permanente.

Eleccion de la Tubería de Ademe

Los productos tubulares de acero se designan de varias maneras, tales como tubos, conductos, tubería, cañería y ademe. La terminología empleada para describir el tamaño y otras características de estos productos tubulares, ha aumentado conforme lo



Fig. 193: Equipo convencional rotatorio con aire; el protector de polvo se muestra en posición alzada.

ha hecho la demanda y sus aplicaciones. En algunos casos los términos resultan difíciles de definir categóricamente. Muchos de estos productos tubulares se fabrican con determinado propósito, y algunos otros reciben su nombre de acuerdo con el uso específico para el cual se han diseñado.

La tubería de acero más apropiada para los diversos tipos de objetivos relacionados con la perforación de pozos, es aquélla que se fabrica de acuerdo con las especificaciones del American Petroleum Institute. Por lo general se prefiere la tubería sin costura y soldada eléctricamente, a la de soldadura de tope.

La especificación 5L del API comprende la tubería de revestimiento roscada y acoplada. Cada tramo de tubería se suministra con una unión de rosca. También se encuentran disponibles uniones de dos roscas de características ligeramente diferentes. Algunos perforadores prefieren el acople que se suministra con cierta tubería, en la que se utiliza un mayor número de roscas. La tubería misma es roscada al igual que la de revestimiento. La especificación API 5L también comprende tubería de extremo liso, sin uniones y sin rosca.



Fig. 194: La tubería de revestimiento roscada API, permite obtener acoplamientos resistentes e impermeables.

La tubería de revestimiento API se fabrica de clases A y B: estas dos designaciones se refieren a las resistencias del material, a la tensión y a la fluencia.

Los tubos de Clase A deben de tener una resistencia a la tensión de por lo menos 3,360 Kg/cm^2, en tanto que la tubería clase B debe de ser de una resistencia a la tensión de 4,200 Kg/cm^2. Cualquiera de ambas clases es satisfactoria para emplearla en construcción de pozos. La mayor parte de la tubería API que se produce para ser usada en perforación de pozos, es de Clase B, por lo que ésta se obtiene con más facilidad que la de Clase A.

En la construcción de pozos debe evitarse el uso de dos tipos de tubería de acero. Uno de ellos es el que comúnmente se conoce como tubería estándar. Aunque ésta se obtiene soldada eléctricamente o sin costura, las roscas y el tipo de unión con que se fabrican son inferiores a las de la tubería de revestimiento. Los diagramas que aparecen en los manuales de tubería muestran las diferencias que existen en los diseños de las uniones de ambas. La tubería de revestimiento y ciertas otras de tipo especial cuestan un poco más que la tubería estándar, pero plenamente justifican su costo adicional. Los acoples son mucho más resistentes y sus extremos rebajados protegen las roscas expuestas de la tubería. Esto reduce la tendencia de la corrosión a carcomer la pared de la tubería en aquella porción roscada que no se halla embebida completamente dentro de la unión.

La tubería de hincado o clavado es otro tipo que ha demostrado no ser adecuada para

la perforación por percusión, aunque originalmente se diseñó para este propósito. Las roscas y el acople se diseñan para que los extremos de los tubos topen por dentro de la unión. Conforme la tubería se hinca, las roscas se aflojan ligeramente. Si la tubería se afloja, esta no podrá ser apretada de nuevo, ya que sus extremos se hallan topados. Los acoplamientos de la tubería de revestimiento sí se pueden apretar fácilmente, puesto que sus extremos no topan y la conicidad o ahusado de las roscas es mayor.

Todos los tamaños de tubería pueden adquirirse ya sea de acero negro o con revestimiento galvanizado (recubrimiento de zinc). La galvanización de los tubos de diámetro mayor que 10 cm., retrasa la producción y esto debe advertirse con anticipación, si se necesitan tamaños mayores de tubería.

La tubería de acero de Especificación API 5L se fabrica no sólo en los Estados Unidos sino también en varios otros países. Los fabricantes de Europa Occidental producen también, bajo otras especificaciones, tubería similar, aunque no



Fig. 195: Extremos de tubería de 40 cms. adecuadamente preparados para soldarlos con puntos de soldadura de apoyo, antes de correr el cordón base en toda su periferia.

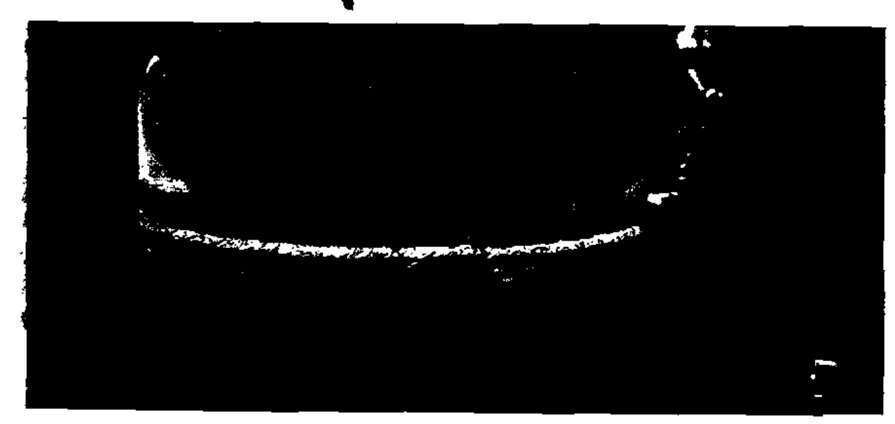


Fig. 196: Primer relleno de soldadura, aplicado sobre el cordón base, en este acople de tubería de 40 cms.; debe limpiarse la escoria antes de correr el segundo relleno. *(Cortesía de Keys Well Drilling Co.*

idéntica. En algunos casos, la tubería europea se fabrica siguiendo medidas métricas antes que dimensionarla en el sistema inglés.

Cementación de la Tubería de Ademe

La cementación del ademe de un pozo representa el llenar el espacio alrededor de la tubería (por lo general el que se halla entre la tubería y el agujero) con una pasta adecuada de cemento o de arcilla. Si la construcción del pozo incluye tanto un ademe interior como otro exterior, la *cementación puede hacerse entre los dos ademes*, además de sellar cualquier abertura que pudiese existir por fuera del ademe exterior.

La cementación se efectúa con una mezcla de cemento Portland y agua. Esta es una lechada que puede inyectarse por entre los tubos y en el espacio anular que se halla alrededor del ademe. La arcilla batida puede utilizarse también para sellar, siempre que se use a una profundidad en donde no se seque ni se contraiga y en que el movimiento del agua no arrastre sus partículas. De cualquier forma, la pasta consiste de una suspensión de partículas en agua.

La pasta de cemento es la que más se usa. Por esta razón, los métodos que aquí se describen se refieren principalmente a ésta. El término *cementación* es utilizado por los perforadores para describir toda la operación de mezclar y colocar la pasta.

El equipo que se utilice para mezclar y colocar la pasta de cemento, no necesita ser muy complicado, en el caso de la mayoría de los pozos, pero sí debe ser adecuado. Tan pronto como el cemento y el agua se mezclan, comienza la reacción química de la fragua. Toda la operación de mezclado y colocación debe realizarse, obviamente, mientras la pasta se halle todavía fluida.

En el Capítulo 10 se describen algunos de los criterios de diseño que se aplican al efectuar cementaciones para protección sanitaria de los pozos. El tamaño del espacio para cementación que debe dejarse abierto al perforar el pozo depende del método de cementación que se emplee. Frecuentemente, el éxito de su aplicación depende del área del espacio anular que se halle alrededor del ademe. El resultado ideal sería el de obtener una completa envoltura de cemento alrededor del ademe, en todo el intervalo vertical que se pretende cementar. Por lo tanto, resulta muy importante estudiar el tamaño del agujero que se va a perforar. Cuando el ademe hace contacto con la pared del agujero, y no se halla bien centrado en éste, se forman pasajes estrechos y puntos aislados, lo que podría producir un encauzamiento de la pasta.

Dosificación de la Pasta de Cemento

La relación agua-cemento para obtener una pasta apropiada debe ser de unos 22 a 27 lts. de agua por cada bolsa de cemento de 50 Kg. Los ensayos de laboratorio de-

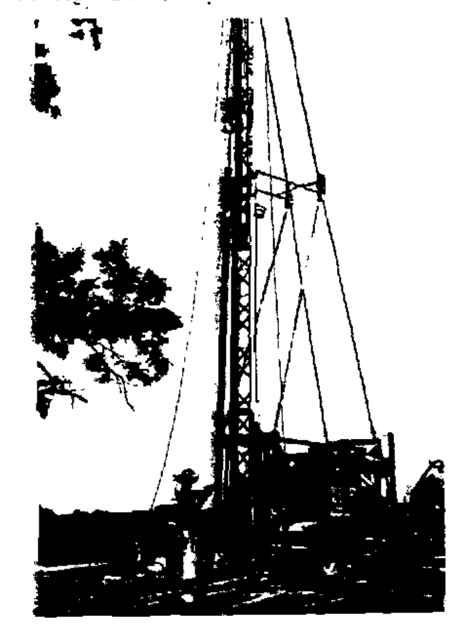


Fig. 197: Completando un acoplamiento soldado en tubería de 15 cms. Los aditamentos para alinear los tramos de tubería se muestran al frente. *(Cortesía de J. Bolliger Sons*

muestran que para hidrolizar una bolsa de cemento de 50 Kg., se necesitan 24 lts. de agua. Para cementar materiales de fundación, se requieren mezclas más fluídas que se obtienen con más de 27 lts. de agua, pero éstas no son tan adecuadas para aplicarlas a pozos de agua. La contracción aumenta con el contenido de agua, pero ésta es expulsada de las mezclas menos viscosas, por la presión ejercida contra la arena fina u otros materiales permeables de las formaciones. El cemento se segrega de la pasta, en lugar de permanecer en suspensión, cuando la relación agua-cemento es mayor de 44 lts. por cada bolsa de cemento.

Una de las ventajas decisivas de una relacion apropiada agua-cemento, consiste en la formación más efectiva de arcos de partículas cementantes en los poros de las formaciones permeables. Este efecto evita la penetración excesiva de la cementación dentro de tales materiales.

Se pueden utilizar arcillas bentoníticas en proporciones que van desde 1.5 a 2.7 Kg. por bolsa de cemento, en cuyo caso deberán utilizarse alrededor de 29 lts. de agua por bolsa. La bentonita ayuda a mantener en suspensión las partículas de cemento, reduciendo así la contracción y mejorando la fluidez de la mezcla. Es preferible mezclar primero la bentonita con el agua, agregando luego el cemento a esa suspensión.

El agua que se use en la cementación deberá hallarse libre de grasa o de cualquier materia orgánica. El contenido de minerales disueltos deberá ser menor de 2,000 ppm; un alto contenido de sulfato resulta particularmente indeseable.

En condiciones excepcionales, se podría necesitar mezclar arena o algún otro material que agregue volumen, para lograr que la mezcla salve las aberturas mayores sin que se produzca una pérdida excesiva del fluído La adición de estros agregados gruesos aumenta la dificultad de manipuleo y de colocación, pero puede ser necesaria, para reducir el costo del material, cuando se requiere rellenar grandes aberturas.

En los casos en que la perforación de un agujero ha sido llevada hasta una profundidad mayor que aquélla hasta la que se cementará el ademe, deberá rellenarse la parte inferior del agujero o se colocará en éste algún tipo de retenedor, para detener la pasta a esta profundidad. Un procedimiento muy corriente consiste en rellenar con arena el agujero hasta la profundidad necesaria. Esta arena debe ser lo suficientemente fina para que el cemento no penetre más de unos 5 ó 7.5 cm. El material que de ordinario se vende como arena de mortero, resulta por lo general adecuado. Más de la mitad de la arena deberá contener tamaños de granos entre 0.012 pulgadas (0.305 mm) y 0.025 pulgadas (0.635 mm). Esta es la granulometría aproximadamente más gruesa que podría amalgamar a la pasta. Los experimentos realizados indican que no se manifiesta una penetración significativamente mayor del cemento, dentro de una arena que contenga granos de un tamaño más fino que 0.025 pulgadas (0.635 mm), o en arena no uniforme cuya permeabilidad sea menor de 122 $m^3/día/m^2$.

Métodos de Colocación de la Cementación

Para garantizar que la cementación produzca un sello satisfactorio, es necesario que se coloque en forma ininterrumpida y antes de que se manifieste la fragua inicial del cemento. No importa el método que se emplee, la pasta deberá introducirse por el fondo del espacio que va a cementarse. Este procedimiento reduce la contaminación o dilución de la pasta y la segregación de la misma.

Para inyectar la cementación dentro del espacio que se va a rellenar, se pueden utilizar ya sea bombas adecuadas, o presión neumática o hidráulica. En algunos casos la

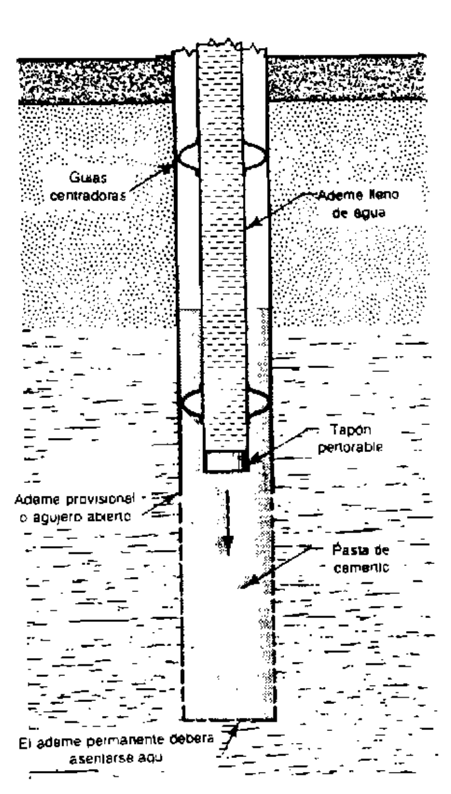


Fig. 198: La pasta de cemento depositada en el fondo del agujero es obligada a subir por el espacio anular cuando se hace descender un tubo de ademe con un tapon colocado en su extremo inferior.

colocación por gravedad resulta también práctica y satisfactoria.

Una manera de colocar la pasta por gravedad consiste en depositarla en el fondo del agujero y hacer descender el ademe dentro de aquélla. Mediante guías apropiadas, la tubería es centrada en la perforación, y su extremo inferior se cierra con un tapón hermético, pero perforable posteriormente. Conforme el tubo se hace descender, la pasta es forzada a subir por el espacio anular, rellenándolo.

Si la tubería no se hunde hasta el fondo por su propio peso, deberá entonces llenarse de agua. En algunos casos, bien podría necesitarse un mayor peso. Cuando se utiliza un ademe provisional, para evitar el derrumbe del agujero, deberá halarse ésta hacia arriba mientras la cementación se mantenga fluída y desarrolle un estrecho contacto con las paredes del agujero. La Fig 198, muestra lo esencial del procedimiento.

Para depositar la cantidad apropiada de pasta en el fondo del agujero ampliado, se deberá utilizar un tubo de 5 a 10 cm. de diámetro. La mezcla, entonces, se introduce por gravedad, manteniendo el tubo de cementación levantado ligeramente por sobre el fondo del agujero. Si éste ha sido perforado por el método rotatorio y se encuentra lleno de fluído de perforación, éste flotará, puesto que la pasta de cemento es más densa. El volumen de pasta que se utilice debe ser el suficiente para rellenar el espacio anular alrededor del ademe permanente conforme éste se hace descender hasta la profundidad que se requiere.

Debe observarse que la presión de cementación es equivalente a la que desarrolla la pasta después de colocada.

Cuando el cemento ha fraguado y endurecido lo suficiente, el tapón del extremo inferior se taladra y la perforación se continúa por debajo de la sección cementada. Un periodo de 72 horas es suficiente para que se efectúe la fragua del cemento Portland. Para reducir este período a unas 48 horas, se puede utilizar cemento de alta resistencia inicial. Resulta una economía falsa y hay gran riesgo en dañar una buena cementación si el tapón se perfora a destiempo.

Tubería Exterior de Cementación

En profundidades del orden de 45 m. y cuando el espacio anular es de tamaño suficiente, la cementación puede realizarse mediante un tubo de pequeño diámetro que se introduce por fuera del ademe. El ademe se hace descender dentro del agujero,

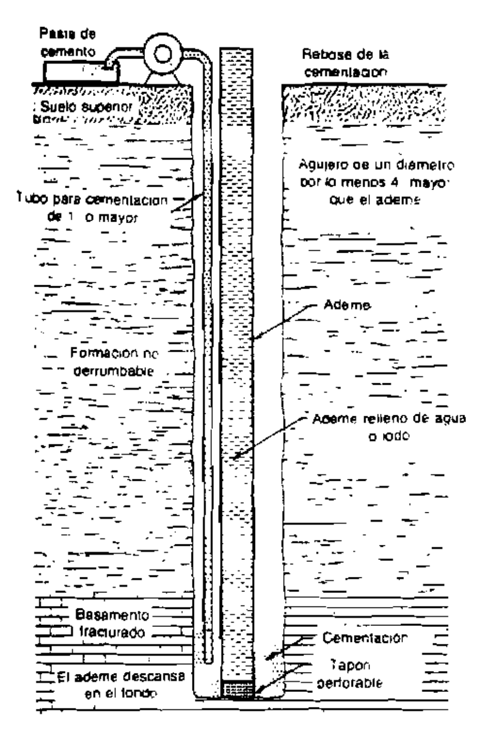


Fig. 199: Cementacion del ademe mediante el bombeo de lechada a través de un tubo que se hace descender por el espacio anular fuera del ademe.

fijándolo a unas guías centradoras. Su extremo inferior se cierra con un tapón perforable, o puede hincarse dentro de la arcilla, de modo que la lechada no puede penetrar.

Para evitar que el ademe flote por efecto de la pasta, el tubo puede llenarse de agua; o puede mantenerse en posición aplicándole el peso de la sarta de perforación.

La tubería de cementación debe ser lo suficientemente amplia para que se pueda depositar el volumen necesario de cementación en el tiempo disponible. Puede utilizarse un tubo de cementación de unos 19 a 25 mm. de diámetro. El agujero ampliado deberá ser de por lo menos 10 a 15 cm. mayor que el ademe, para proveer suficiente espacio que permita acomodar la tubería de cementación.

Se puede realizar la cementación por gravedad cuando se esté seguro de que la operación puede efectuarse rápidamente. Sin embargo, se prefiere el bombeo, ya que así se puede introducir más rápidamente el volumen necesario. Deberá preveerse, y posiblemente sea la que se requiera, una presión por bombeo igual a la presión hidrostática de la pasta, más la fricción que el fluído desarrolla en la tubería de cementación y en el espacio anular.

Manipulación de la Tubería de Cementación

En este método la tubería de cementación es similar al tubo trompa corrientemente empleado cuando se depositan grandes masas de concreto debajo del agua. El tubo

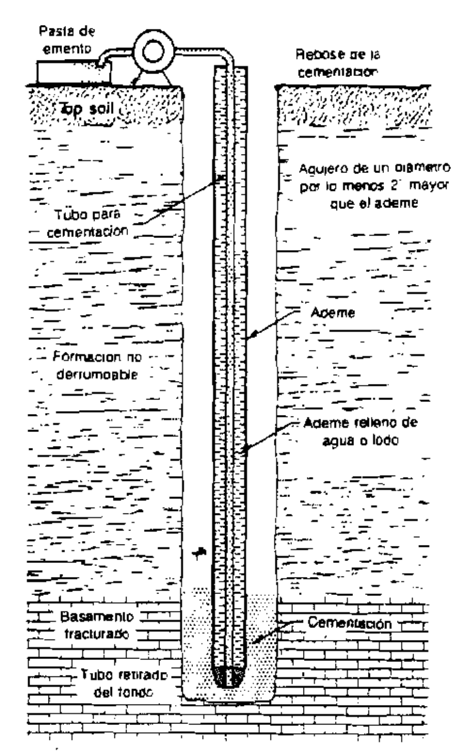


Fig. 200: El tubo de cementación por dentro del ademe, se conecta a un tapón perforable de cementación o a una zapata con válvula de retención, en su extremo inferior.

debe extenderse inicialmente hasta el fondo del espacio anular y deberá permanecer sumergido dentro de la pasta durante todo el tiempo que dure la cementación.

El tubo puede dejarse en su lugar o puede irse retirando gradualmente.

Si por alguna razón la operación debe interrumpirse, la tubería deberá levantarse por encima del nivel alcanzado por la cementación y no debe volverse a introducir dentro de la pasta, al continuar la operación, hasta que toda el agua y el aire hayan sido expulsados del tubo.

Tubería de Cementación por Dentro del Ademe

Cuando no resulta práctico el uso de un pequeño tubo por fuera del ademe, la cementación puede efectuarse mediante un tubo ad hoc instalado dentro de aquél. En la industria petrolera, este procedimiento recibe el nombre de cementación por tubería. En el fondo del ademe se instala un obturador especial que permite la salida de fluído desde la tubería de cementación y evita que la misma invada el ademe, tanto cuando se está efectuando como cuando se ha retirado el tubo de cementación. Este accesorio se denomina zapata de cementación o zapata de flotación. La Fig. 201 muestra un modelo típico, dotado de una válvula de retención a bola, la cual previene de cualquier inversión de flujo que pudiera sufrir la cementación.

El ademe, con su zapata de flotación en posición y la tubería de cementación adecuadamente instalada, se suspende por sobre el fondo del agujero. El ademe deberá llenarse de agua, imprimiéndole así el peso necesario para que no flote. La pasta se bombea a través de la tubería de cementación, forzándola a que suba alrededor del ademe. Cuando el cemento aparece en la superficie y la pasta ha desplazado cualquier otro fluído del espacio anular, la tubería de cementación se desconecta de la zapata de flotación. Bombeando agua a través, se limpia el cemento que haya quedado dentro del tubo, después de lo cual éste puede retirarse del pozo.

En muchos casos la cementación se puede hacer fluir por gravedad a través de la tubería de cementación y luego hacia arriba por el espacio anular. Sin embargo, la colocación por gravedad resulta lenta, por lo que las limitaciones de tiempo permiten que solamente pequeños volúmenes se puedan manipular por este procedimiento. Se necesita el bombeo para acelerar la operación. También puede necesitarse la presión de una bomba para mover pesadas bolas de fluído de perforación que tienden a obstruir, durante la operación, el espacio anular.

La cementación puede hacerse en algunos casos sin necesidad de utilizar el tapón de cementación o la válvula de flotación en el

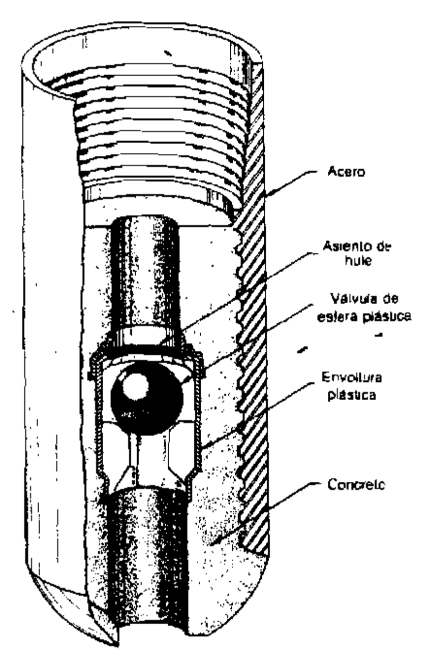


Fig. 201: Detalles de un tapón de cementacion o zapata de flotación, con válvula de retención a bola, adecuado para trabajos en pozos.
(Cortesía de Baker Oil Tools, Inc.)

ademe. Este método exige que la tubería de cementación se haga pasar a través de una empaquetadura hermética que se coloca en un tapón reforzado para cerrar el extremo superior del ademe. La tubería de cementación se coloca de modo que sobresalga por lo menos unos 0.90 ó 1.20 m. por debajo del fondo del ademe, el que a su vez se suspende ligeramente por encima del fondo del agujero. La tubería de cementación se instala de modo que pueda halarse hacia arriba, a través de la empaquetadura, unos 6 m., cuando la inyección de pasta ha terminado. Una válvula de purga instalada convenientemente permite que el aire escape del ademe, conforme el interior de éste se va llenando con agua o con fluído de perforación.

El primer paso consiste en llenar el ademe y el espacio anular por fuera de éste con agua o lodo. Estando cerrado el extremo superior del ademe, se da comienzo a la cementación, forzando la pasta a través de la tubería y hacia arriba por el espacio anular. Tan pronto el cemento aflora en la superficie y alrededor del ademe, se bombea agua limpia en cantidad apenas suficiente para limpiar de cemento la tubería. En este momento la tubería de cementación se retira con tanta rapidez como lo permita el primer acople situado por debajo de la caja de empaquetadura. Esto evita que el tubo de cementación se adhiera al cemento depositado en los 0.90 ó 1.20 m. por debajo del extremo inferior del ademe.

Tanto el ademe como el tubo de cementación deben mantenerse herméticamente cerrados a presión hasta que el cemento haya fraguado, después de lo cual se pueden retirar los accesorios empleados en la cementación. Cuando ésta haya endurecido lo suficiente, el tapón de cemento en el fondo del ademe puede perforarse y continuarse con el trabajo del pozo.

Cementación a Través del Ademe

El método de cementación a través del ademe, en el cual la pasta es forzada a descender por éste, y de ahí a desplazarse por el espacio anular, se usa ampliamente en la industria petrolera. El sistema de taponamiento que hace uso de uno o dos tapones separadores fue desarrollado y patentado hace algunos años por la Haliburton Oil Well Cementing Company de Duncan, Oklahoma. Uno de los tapones separa la pasta de cemento del fluído contenido en el ademe; el otro separa esta misma pasta del agua que se bombea por encima para desplazar la mezcla contenida en el ademe.

Después de bombear agua o lodo a través del ademe para hacer circular el fluído por el espacio anular y eliminar cualquier obstrucción en el agujero, se introduce el primer tapón y se cierra el ademe. Luego se bombea un volumen determinado de pasta y, abriendo el ademe, se coloca un segundo tapon. Despues se introduce por bombeo un volumen conocido de agua por encima del segundo tapón, lo que empuja a éste hasta el fondo del ademe y hace que la pasta salga por el extremo inferior hasta alcanzar el espacio anular. El agua contenida en el ademe debe mantenerse a presión para evitar la devolución de la pasta hasta que ésta haya fraguado y endurecido.

Una modificación de este procedimiento con la que muchos perforadores están de acuerdo, consiste en utilizar únicamente el tapón inferior; luego, después de bombear una cantidad predeterminada de pasta, se sigue con un volumen de agua suficiente para obligar a que salga del ademe la mayor parte de la lechada de cementación. En la práctica usual, se dejan por lo general unos 3 a 7.5 m. de pasta dentro del tubo.

La otra modificación es la que utiliza solamente el tapón superior. La razón que se da para proceder así, es la de que la parte de pasta que podría ser diluída por el fluído

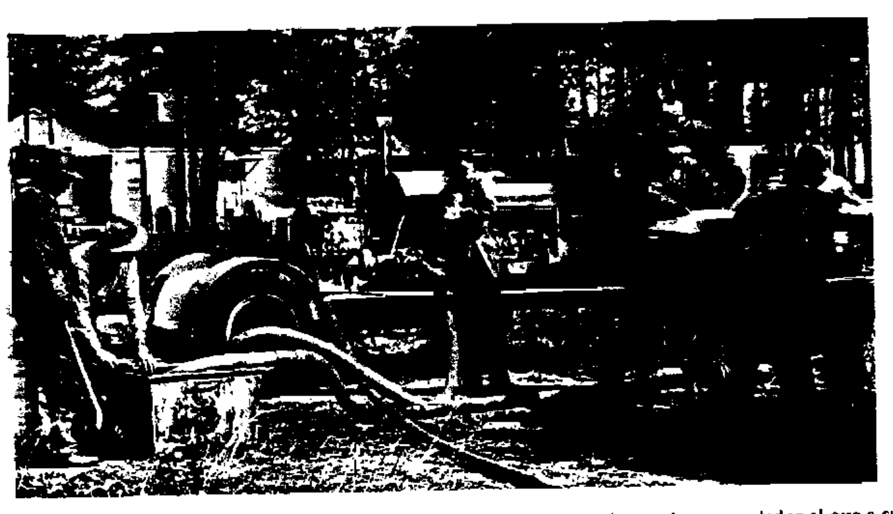


Fig. 202: La cuadrilla que aparece a la derecha vacia bolsas de cemento dentro de un mezclador el que a su vez la envia al pequeño tanque mostrado a la izquierda. La bomba aspira la mezcla de este tanque y la impulsa a traves de la manguera de descarga hasta el pozo que está siendo cementado.
(Cortesia de Sydnor Well and Pump Co.)

contenido en el pozo es así expelida y arrojada a la superficie. Ello asegura una cementación homogénea y no contaminada en el extremo inferior del ademe.

Algo muy importante que se debe tener en cuenta es que los tapones espaciadores deben estar hechos de materiales que se puedan despedazar sin dificultad. Cuando un tapón reposa sobre arena o arcilla, el efecto amortiguador de estas formaciones suaves retarda la perforación del tapón. Se sabe que ciertos tapones de madera o de alguna combinación de hule y fibra, han tenido que ser empujados a través de 1.50 a 6 m. dentro de una arcilla, antes de que pudieran ser destruídos por el barreno. El trenzado de fibras de madera o de lona resulta muy voluminoso y podrían llegar a obstruir el flujo hacia el pozo si simplemente se hacen a un lado cuando se está perforando dentro de la formación acuífera.

Es muy importante que la mezcla para cementación sea vigorosamente mezclada y se encuentre libre de grumos. Si la mezcla se adquiere en una planta de concreto premezclado, debe asegurarse de que tenga

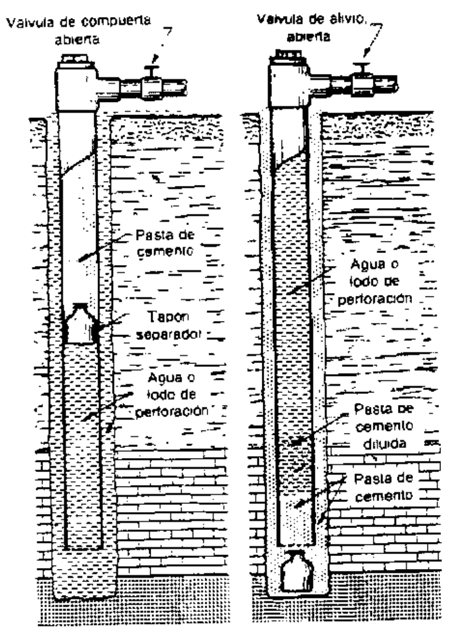


Fig. 203: Cementación a través del ademe, utilizando un solo tapon intercalado entre la columna de cementacion y el fluido de perforación. Tanto el tapom como la pasta son obligados a salir por el fondo del ademe; la cementación se desplaza luego hacia arriba por el espacio anular.

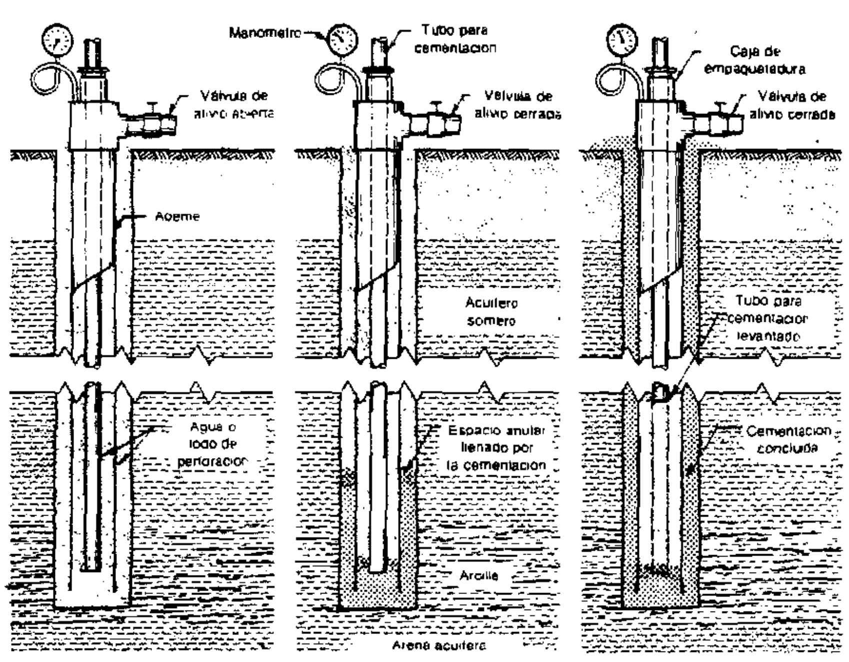


Fig. 204: La cementacion mediante el uso de tuberia ad hoc, puede efectuarse manteniendo fluido a presion dentro del ademe, hasta que la pasta endurezca.

las proporciones correctas. El perforador deberá insistir en que los camiones de transporte hayan sido eficazmente limpiados y se hallen libres de piedras o grumos de concreto antes de transportar la mezcla para cementación. En cualquier caso, es mejor proveer un pascón protector en el tanque desde donde se bombea la pasta dentro del agujero.

Mezclado de la Pasta

No siempre se puede determinar con exactitud el volumen necesario de mezcla para cementación. En muchos pozos tienen lugar irregularidades en el tamaño del agujero y pérdidas dentro de las fracturas de la roca. En tales casos, el perforador deberá estar preparado para los imprevistos.

La mayoría de los perforadores utilizan mezclas corrientes de cemento en aquellas cementaciones que necesitan de 15 a 50 bolsas de este material. Tratándose de volúmenes mayores, es mejor utilizar un mezclador de chorro parecido al que se usa en la preparación del fluído de perforación.

Conforme sea mayor el volumen de cementación, más seguras deben ser las provisiones que se tomen para mezclar y colocar la pasta. Resulta riesgoso el intentar efectuar cualquier trabajo voluminoso de cementación, sin la plena seguridad de que los dispositivos de mezclado realizarán una labor eficiente y suficientemente rápida como para que se pueda colocar en forma ininterrumpida la mezcla de principio a fin.

Los pozos abandonados y mal construídos proporcionan aberturas verticales o conductos a través de los cuales, el agua contaminada puede tener acceso a los acuíferos de agua dulce y contaminarlos. La cementación de los pozos abandonados se discute en otro capítulo posterior, en relación con la protección sanitaria de los recursos de agua subterránea.

Verticalidad y Alineamiento

Posiblemente, cualquier persona estaría de acuerdo en que un pozo debe hallarse tanto recto como a plomo. Al mismo tiempo, todos comprendemos que no es posible garantizar que un agujero, perforado dentro de la tierra y que alcance una profundidad apreciable, sea completamente recto y se halle perfectamente a plomo. En la práctica, deberán permitirse algunas tolerancias o desviaciones. En la mayor parte de los casos el contratista de perforación puede mantener el alineamiento del pozo dentro de ciertos límites prácticos si ejerce un cuidado razonable.

Para determinar cuánto se ha desviado un pozo de la vertical y en qué magnitud se aparta éste de la línea recta, se aplican métodos especiales para determinar estas desviaciones. Algunas especificaciones exigen que la verticalidad sea verificada con una plomada especial y que la rectitud se constate con un calibrador cilíndrico de 12 metros de longitud y de un diámetro ligeramente menor que el del ademe del pozo.

Sin embargo, es posible medir tanto la desviación de la vertical como la rectitud mediante el solo uso de la plomada.

De los dos factores mencionados, la rectitud del pozo es de mayor importancia, puesto que es la que determina si una bomba del tipo de turbina vertical puede o no instalarse en el pozo hasta la profundidad que se desea. Si el pozo se encuentra torcido, después de un cierto límite la bomba sencillamente no pasará.

En un pozo que no sea recto, aunque se halle fuera de plomo, puede instalarse sin dificultad cualquier bomba. Cuando la desviación de la vertical es mucha, ello puede afectar la operación y acortar la duración de ciertas bombas, por lo que la verticalidad necesita no salirse de límites razonables.

Las condiciones causantes de que los pozos se tuerzan o se hallen fuera de plomo son las siguientes: carácter del material del subsuelo que se atraviesa mientras se perfora, alineamiento del tubo que se use como ademe, y la fuerza de empuje aplicada a la tubería de perforación, cuando se usa el sistema rotatorio. Mientras se perfora, la gravedad tiende a hacer que el trépano taladre un agujero vertical. La dureza variable de los materiales en que se está penetrando desvía el trépano de la trayectoria verdaderamente vertical. El borde de un canto contenido en un residuo glacial puede deflectar un barreno de percusión o un trépano rotatorio hacia un lado. En el sistema de percusión, el canto puede deflectar el ademe conforme este se va hincando y causar que el agujero se desvíe progresivamente conforme el pozo se hace más profundo.

Cuando se está perforando por el método

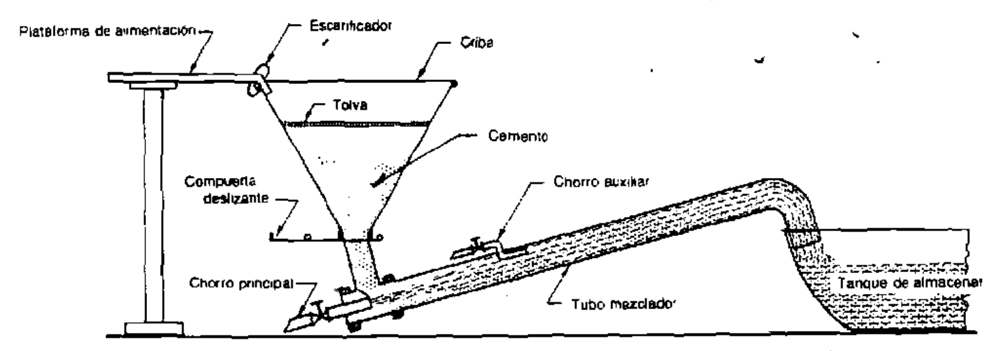


Fig. 205: Detalles de un mezclador del tipo de chorro, para mezclar Cemento Portland con agua.

rotatorio, la mucha fuerza aplicada al extremo superior de la barra de perforar puede doblar la esbelta columna de tubería. Esto hace que el trépano comience a cortar fuera de centro. Cuando se usan pesadas barras colocadas en la parte inferior de la sarta con el objeto de aplicar suficiente peso por encima del trépano, se evita en parte la tendencia de este último a desviarse de la vertical.

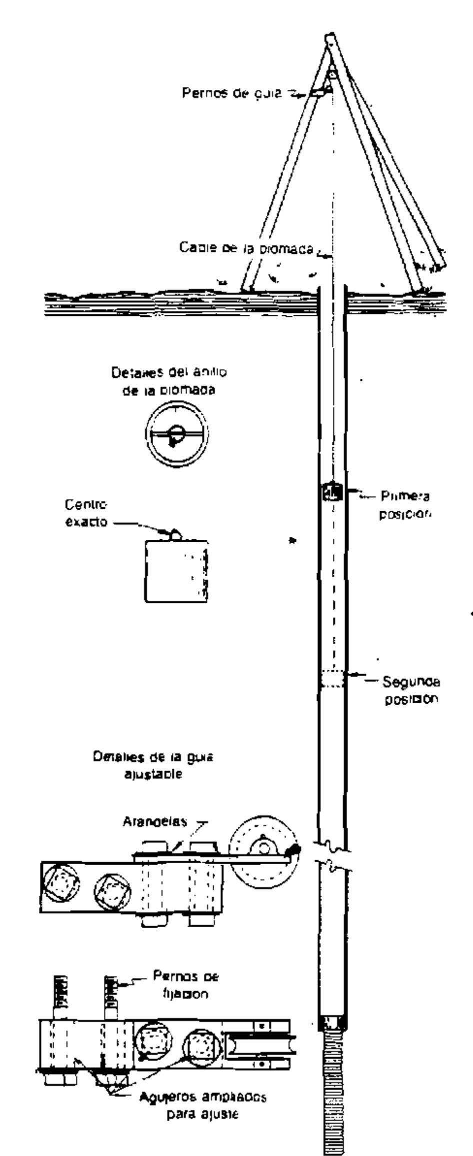


Fig. 206: Disposición característica para verificar la verticalidad y el alineamiento de un pozo.

Es obvio que cualquier variación del alineamiento de la tubería que se este utilizando como ademe ocasionará en buena parte el desalineamiento del pozo. Los tramos de tubería pueden hallarse ligeramente arqueados o el eje de los extremos roscados no coincidir exactamente con el de la tubería. Ciertas tolerancias comerciales permiten alguna desviación de la rectitud de la tubería y de la precisión de las roscas. Estas deben ser tenidas en cuenta cuando se especifica la desviación permisible del alineamiento de un pozo.

La mayoría de los perforadores verifican el alineamiento del agujero varias veces cuando están perforando un pozo de profundidad sustancial. Esto es especialmente muy corriente en la perforación por percusión. Se puede economizar tiempo y dinero cuando se toman las medidas necesarias para corregir el alineamiento del pozo tan pronto como se observe alguna tendencia de este a torcerse. En la perforación por rotación, el alineamiento se verifica por lo general únicamente después de que se ha introducido el ademe, pero siempre antes de que éste sea sellado dentro del agujero por cementación o de alguna otra manera.

Los dispositivos esenciales para verificar la rectitud y verticalidad de un pozo, se muestran en la Fig. 206. La plomada está constituída por un cilindro corto cuyo diámetro exterior es de alrededor de 6.5 mm. menor que el diámetro del agujero. Se halla provisto de un gancho con el cual puede suspenderse de un cable. El punto de suspensión debe coincidir con el centro exacto del dispositivo. El peso de la plomada debe ser suficiente para poner tenso el cable. Un cable de alambre de 3.2 mm. de diámetro constituye un buen tirante que no se dobla fácilmente.

El cable puede suspenderse de la torre de una máquina de perforar, o de un trípode con un malacate, tal como se muestra. Aparte del tipo de estructura soportante, deberá proveerse una guía ajustable, de modo que el peso de la plomada quede suspendido exactamente en el centro del extremo superior del ademe.

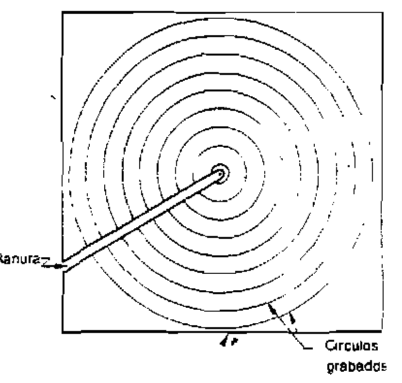
La guía ajustable se coloca de manera que la distancia vertical desde el centro de la pequeña polea o rondana al extremo superior del tubo de ademe sea exactamente de 3.0 m. Enseguida, la guía ajustable se desplaza horizontalmente de modo que la plomada pase por el centro del tubo de ademe.

Se da comienzo al ensayo desarrollando un poco de cable hasta que la plomada descienda unos 3 metros. Si el cable de la plomada se desplaza hacia afuera del centro del pozo en cualquier dirección, se mide entonces esta desviación. Se hace descender el peso de la plomada otros 3 m. y el nuevo desplazamiento del cable, estando la plomada en esta segunda posición, se mide también. El procedimiento se repita una y otra vez, hasta que el pozo haya sido verificado en toda la profundidad que se desee.

Algunas veces el desplazamiento del cable se mide hasta el borde del ademe. Esto únicamente se puede hacer si el ademe es perfectamente cilíndrico.

Si el tubo de ademe no es perfectamente cilíndrico, se puede utilizar un dispositivo como el que se muestra en la Fig. 207, para medir los desplazamientos del cable. Consiste de una lámina plástica transparente sobre la cual se han trazado varios círculos concéntricos. El centro exacto de los círculos se marca, y se corta una ranura que se extiende desde el centro hasta el borde de la lámina. Los círculos concéntricos permiten centrar exactamente la lámina plástica en el borde superior del ademe.

El dispositivo se usa primero para determinar si el cable coincide con el centro de ademe, estando la plomada suspendida



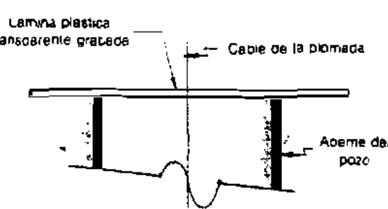


Fig. 207: Una lámina plástica con círculos impresos, colocada en el extremo superior del ademe, sirve para medir la desviación de la plomada desde el centro.

justamente por debajo del extremo superior de la tubería. Conforme la plomada desciende, la lámina plástica se puede hacer girar sobre la boca del ademe hasta que la ranura quede orientada en la dirección en que se ha desplazado el cable desde el centro. Se pueden medir luego las desviaciones a lo largo de la ranura, conforme el ensayo prosigue.

En tanto la línea de plomada pase por el centro del extremo superior del ademe, el pozo se halla a plomo hasta la profundidad a la cual se ha suspendido el peso. Cualquier desviación del pozo causará que la plomada se desvíe.

La desviación a cualquier profundidad viene a ser la magnitud del desplazamiento medido, multiplicada por la longitud total del cable, y dividida por la distancia fija o constante que media entre la polea y el borde superior del ademe.

Supóngase por ejemplo, que el cable se halla suspendido a 3 m. por encima del

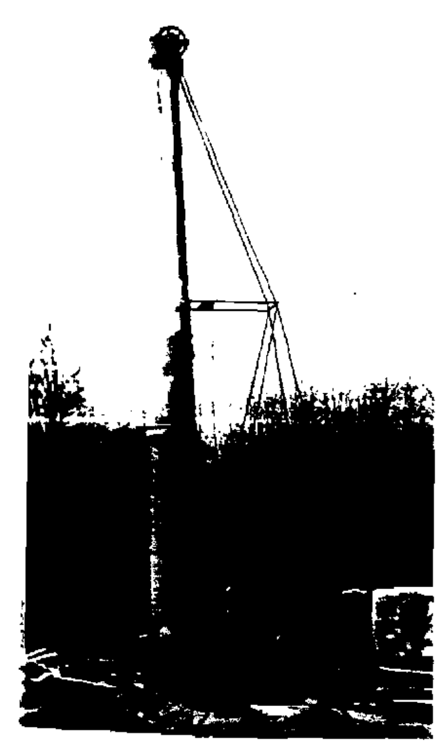


Fig. 208: Colocación de una Rejilla Johnson de 51 cm. de diámetro, dentro de un pozo en Nanaimo, *Columbia Británica*, Canadá.
(Cortesía de Pacific Water Wells)

extremo superior del ademe, y que cuando la plomada se hace descender 3 m. dentro del pozo, el cable se desplaza 6.4 mm del centro. La desviación del ademe, en este caso, será de: 6.4 x 6/3 = 12.8 mm. Cuando el peso se hace descender otros 3 m., se halla por lo tanto a 3 veces la distancia entre la polea y la boca del ademe. En consecuencia, la desviación a 6 m. de profundidad, será de 3 veces la cantidad medida desde el centro del ademe al cable.

A una profundidad de 30 m., el peso se encontrará a 33 m. por debajo del punto de suspensión y el factor de multiplicación será esta vez de 11. Supongamos que el cable se halla a 2.5 cm. del centro del ademe; en este caso, la desviación del pozo de la vertical es de 27.5 cm., a la profundidad de 30 m.

Si el incremento de desviación es constante para cada aumento de 3 m. en el descenso de la plomada, ello significa que el pozo se halla recto entre estos puntos, pero no está a plomo. Si una sección está torcida, los diferentes valores de desviación para incrementos sucesivos de 3 m. ponen lo anterior en evidencia.

Los valores calculados de desviación pueden plotearse contra valores de la profundidad, obteniéndose así un gráfico que

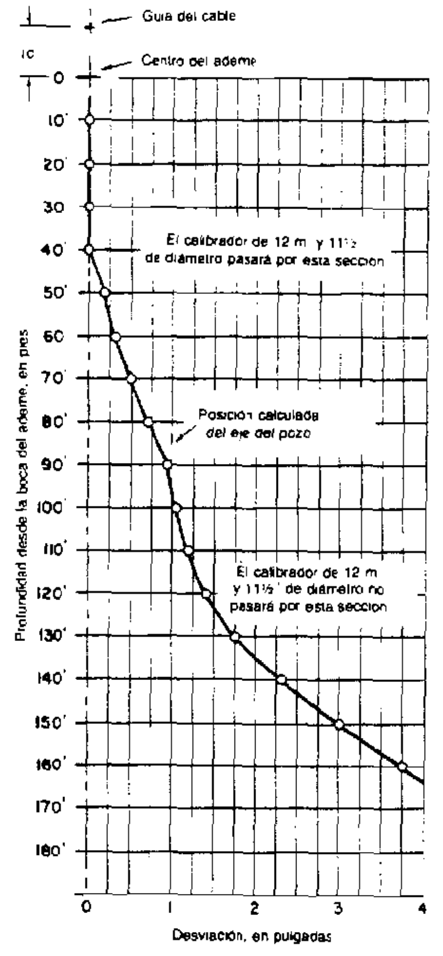


Fig. 209: Gráfico que muestra la traza del eje central de un pozo torcido y que se encuentra fuera de plomo.

indique la posición del eje o línea de centro, de un agujero para pozo.

La Fig. 209 muestra este tipo de gráfico en el caso de un pozo que se halle fuera de plomo y que está torcido. El gráfico indica que el ademe se encuentra recto y vertical hasta una profundidad de 12 m. La deflexión que se manifiesta al nivel de los 12 m. forma lo que los perforadores denominan "pata de perro". Desde este punto hasta una profundidad de 35 m. el tubo de ademe está recto pero no vertical. Por debajo de los 35 m., el ademe se curva gradualmente hacia la derecha y en esta sección ya no se halla ni recto ni vertical.

El gráfico de la Fig. 209 puede utilizarse para determinar si un calibrador de 12 m. de longitud y con un diámetro de 12.7 mm. menor que el diámetro interior del pozo, podría pasar por los puntos de desalineación. Para verificar las condiciones, precisamente en el punto de la "pata de perro", se dibuja una línea recta desde los 6 m. hasta los 18 m. de profundidad. Este intervalo corresponde a la longitud del calibrador de 12 m. Se mide luego la máxima desviación del gráfico a ángulo recto con la línea, usando para ello la misma escala que fue utilizada para plotear la desviación del pozo. Si esta desviación resulta ser inferior a 6.4 mm., el calibrador pasará libremente; si es mayor, entonces no pasará por debajo de los 18 m. de profundidad.

Si cualquier desviación medida en el gráfico de alineamiento es mayor que la mitad de la diferencia que existe entre los diámetros del ademe y del calibrador, éste ultimo se acuñará dentro del pozo si se le permite descender.

En el ejemplo anterior, la desviación a los 12 m. de profundidad es de 4.8 mm., por lo que el calibrador podría pasar por el nivel a que tiene lugar la "pata de perro". Al verificar en la misma forma el tramo curvado que se encuentra cerca de los 36 m. de profundidad, se observa, sin embargo, que el calibrador tropezaría justamente por debajo de tal profundidad, ya que la desviacion a este nivel es de 9.5 mm.

Referencias

1. GORDON, R. W., "Water Well Drilling with Cable Tools." (1958), 230 pp Bucyrus-Erie Co., South Milwaukee, Wisconsin.
2. "Wells." TM 5-297, AFM 85-23, (1957), pp 16–145, Department of the Army and the Air Force, Washington.
3. ANDERSON, Keith E., "Water-Well Handbook." (1948) Missouri Water Well Drillers' Association, Rolla.
4. "Cable Tool Drilling Manual." 50 p Sanderson Cyclone Drill Co., Orville, Ohio.
5. BRANTLY, J. E., "Rotary Drilling Handbook." (1948), 565 pp Palher Publications, Los Angeles
6. "Driller's Handbook" (1959), Reprints from the Oil and Gas Journal, Tulsa, Oklahoma.
7. "Drilling Mud Data Book." Baroid Division, National Lead Company, Houston, Texas
8. CODE, W. E., "Rotary Method of Drilling Large Diameter Wells Using Reverse Circulation." Water Well Journal, July-Aug. 1949. Urbana, Illinois
9. GOSSETT, O. C., "Reverse Circulation Rotary Drilling." Water Well Journal, Nov 1958. Urbana, Illinois
10. CEDERSTROM, D. J. and TIBBITTS, G. C., "Jet Drilling in Fairbanks Area, Alaska," Water Supply Paper 1539-B (1961), 28 pp. U.S Geological Survey, Washington.
11. "Standard and Line Pipe" (1965), 52 pp. Republic Steel Corporation, Cleveland, Ohio.
12. MACHIS, ALFRED, "Experimental Observations on Grouting Sands and Gravels," ASCE Proceedings, November, 1946; pp 1207, 1218, 1226, 1227, American Society of Civil Engineers, New York
13. "Bob Christenson's Strong Point: Grouting," The Driller, Vol. 37, No. 4 (1963) pp 12–18. Bucyrus-Erie Co., South Milwaukee, Wisconsin.
14. "Blaster's Handbook," E. I. du Pont de Nemours & Co., Inc., Wilmington, Delaware

Capitulo 12

Instalacion de Rejillas de Pozo

La instalación de la rejilla constituye uno de los elementos esenciales de la completación de un pozo. El acabado del pozo comprende todas aquellas etapas del trabajo, además de la perforación misma, que deben realizarse para poner al pozo en condiciones de uso. Las etapas tales como la cementación del ademe dentro del agujero, instalación de la rejilla, desarrollo y desinfección, son todas parte de la terminación del pozo.

Los procedimientos empleados para instalar las rejillas varían con el diseño del pozo y con el método que se haya utilizado al perforarlo. Los problemas que se presenten durante la perforación puede que obliguen a utilizar un método diferente al que se pensó usar en un principio. En este capitulo se describirán los métodos que más comúnmente se emplean.

Cuando el agujero se perfora por el método de percusión, el procedimiento que más se aplica es el de retracción del ademe. Los elementos básicos del método consisten en hacer descender la rejilla por dentro del ademe hasta la profundidad total del pozo, y luego, retraer el ademe en una distancia suficiente para que deje expuesta la rejilla en el intervalo productor del acuífero.

Aunque resulta de particular aplicación al sistema de percusión, el método de retracción constituye la manera más sencilla y mejor de colocar la rejilla, no importa el tipo de perforación que se haya utilizado. El requisito principal del éxito en la instalación consiste en utilizar un ademe de calidad, condiciones y resistencia tales, que permita hacerlo descender hasta el fondo del agujero y luego halarlo hacia arriba, en el tanto en que se desea que la rejilla quede expuesta. Si se siguen las prácticas convenidas para evitar la excesiva fricción que puede desarrollarse, se eliminan la mayor parte de las dificultades que se presentan al halar el tubo, excepto cuando los materiales de la formación ejercen una fricción extraordinaria sobre la pared del mismo.

El tipo telescópico de rejillas de pozo, se desarrolló en un principio para facilitar la colocación en los pozos perforados por percusión. Tal como el mismo término, "tamaño telescópico", lo sugiere, la rejilla se fabrica del tamaño exacto que permita introducirla por dentro de la tubería estándar

del diámetro correspondiente, al igual que las secciones de un telescopio. Por ejemplo, una rejilla de un diámetro telescópico de 15 cm., tiene el tamaño justo para ser introducida en un tubo estándar de 15 cm. de diámetro; una de 40 cm. de diámetro telescópico, está hecha para pasar a través de un tubo de 40 cm. de diámetro exterior (OD). Siempre se provee la luz suficiente para evitar que la rejilla se quede trabada, manteniendo al mismo tiempo el mayor diámetro posible.

El extremo superior de la rejilla se acondiciona con un empaque o collar de plomo. Una vez que la rejilla ha sido instalada, este empaque es expandido, para constituir un sello a prueba de arena, entre el extremo superior de al rejilla y el interior del tubo de ademe. Para expander el empaque por dentro del ademe, se utiliza una herramienta de recalcar o apisonar. Algunas veces, se utiliza un empaque autoexpandible de material flexible que sella herméticamente el ademe.

Para cerrar el fondo de la rejilla, se provee por lo general una placa resistente dotada de una asa. Utilizando el cable de la cuchara de perforación, al cual se fija un gancho plano, se hace descender la rejilla dentro del pozo, suspendiéndola del asa situada en el fondo. Algunas veces, para suspender la rejilla se utiliza una sarta de tubería de pequeño diámetro, a la cual se adapta un gancho.

Una vez que el ademe se ha llevado hasta la profundidad a la cual se va a colocar el fondo de la rejilla, deberá eliminarse la arena que haya entrado a la tubería. Si hay problema en evitar que la arena ascienda por dentro del ademe, esto se puede solucionar agregando agua, para mantener el nivel de ésta, por encima del nivel estático de la formación acuífera. También resulta útil el empleo de una pequeña cuchara que se mueva lentamente para evitar cualquier succión en el fondo del pozo.

Luego se hace descender la rejilla por dentro del ademe hasta el fondo del pozo. Si la rejilla consta de dos o más tramos, se levanta primero el inferior mediante una cuerda, y se suspende por dentro del ademe, utilizando un par de abrazaderas. Enseguida se levanta también el próximo tramo y se enrosca o se suelda al primero.

Una vez que la rejilla se ha armado, se introduce el gancho en el asa de izar y se hace descender hasta el fondo del agujero. Cuando el nivel del agua se mantiene a unos 10 m., las rejillas, cuando son pequeñas pueden dejarse caer por dentro del ademe. Siempre deberán efectuarse mediciones muy precisas para que el perforador sepa en cualquier momento la posición exacta de la rejilla.

Se recomienda como una sana práctica, hacer descansar una sarta de tubería pequeña en el fondo de la rejilla mientras se efectúa la retracción del ademe. Con ello se obtiene un mayor peso, que mantiene a la rejilla en el fondo y permite conocer su posición exacta durante la operación. El ademe puede retraerse mediante cualquiera de los métodos que corrientemente se utilizan. Si éste se ha hecho descender por el método de percusión, puede halarse mediante un golpeteo con las herramientas de perforación o mediante un bloque golpeador. Puede que se necesiten gatas mecánicas o hidráulicas para proporcionar la fuerza necesaria para levantarlo. Si ello es necesario, deberá utilizarse una abrazadera de cuñas, la cual se fija al ademe. Algunas veces, el ademe puede levantarse con el cable de ademado de la máquina de perforación por percusión.

Cuando el ademe ha sido retraído y toda la rejilla ha quedado expuesta en el acuífero, se hacen las mediciones finales. El empaque de plomo deberá quedar situado a unos 15 ó 30 cm. por encima del extremo inferior del ademe. Seguidamente, se expande el empaque para constituir un sello hermético entre el extremo superior de la rejilla y el interior del ademe.

Cuando se usa el bloque recalcador o apisonador para expander el empaque,

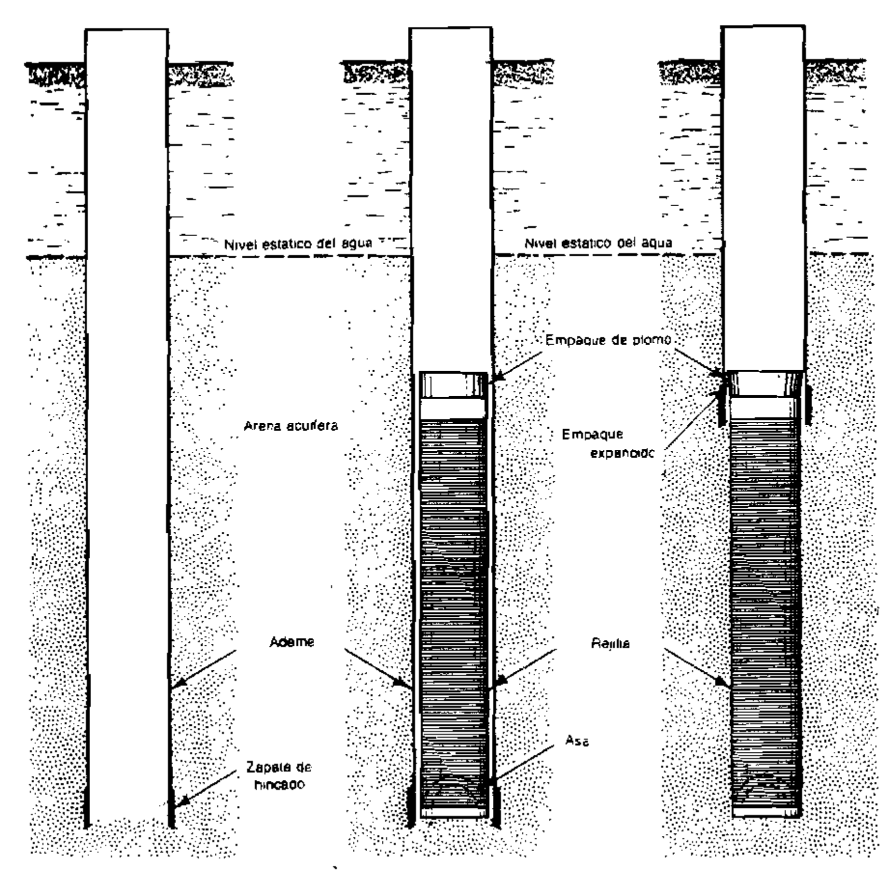


Fig. 210: Operaciones fundamentales de la colocación de una rejilla de pozo, por el método de retracción del ademe. El ademe se lleva hasta el fondo del agujero; la rejilla se hace descender por dentro del tubo y luego éste se hala hacia arriba para dejar expuesta la rejilla en el intervalo productor del acuífero.

deben enroscarse dos o tres tramos de tubería de pequeño diámetro a la barra que se desliza por dentro del bloque. Esta barra deslizante proporciona una carrera descendente de alrededor de 30 cm. El conjunto deberá hacerse bajar por dentro del pozo hasta que el bloque recalcador descanse sobre el empaque de plomo. El peso provisto por la tubería fijada a la barra deslizante deberá luego levantarse unos 15 ó 20 cm. y dejarse caer varias veces. El bloque de recalque o de apisonado no deberá separarse del empaque, levantándolo; simplemente le transmite a éste los golpes sucesivos que se aplican por medio de la barra y del peso que se halla por encima de ésta.

Pozos Perforados por Rotación

El método de instalación de rejillas por retracción del ademe, es el más práctico que se utiliza en el caso de pozos perforados por el sistema de rotación. Una vez concluída la perforación, se hace descender el ademe dentro del agujero, y se eliminan cuidadosamente todos los fragmentos y cortaduras que pudieran haber quedado en el fondo. Enseguida, se introduce la rejilla por



Fig. 211: Rejilla Johnson de Everdur, de 6 m. de longitud, lista para ser colocada en un pozo de 30 cm. de diametro en Terre Haute, Indiana.
(Cortesía de Sutherland-McDaniel Drilling Co.)

el ademe hasta el fondo del agujero, retrayendo aquél, para dejarla expuesta. La principal diferencia con este método estriba en que el ademe debe suspenderse a nivel del terreno durante el desarrollo del pozo mediante el empleo de abrazaderas y cuñas. Como no existe fricción por fuera de la tubería, ésta no se mantendrá en posición por sí sola, hasta que el material de la formación derrumbe y la aprisione.

Pareciera que la colocación del ademe en el fondo del agujero implica un pequeño trabajo adicional. Sin embargo, esta operación evita cualquier dificultad que pudiera presentarse como resultado de la socavación prematura del agujero, algo que es muy importante tener en cuenta.

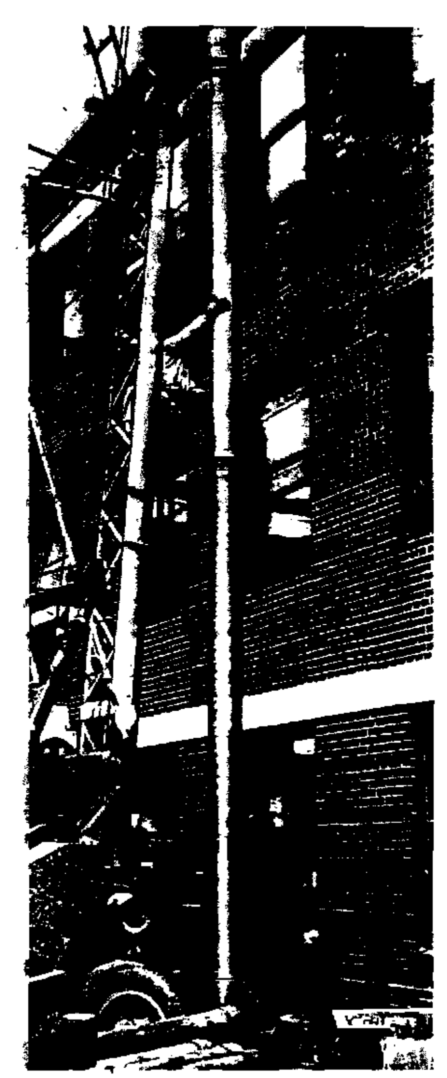


Fig. 212: Armado de una rejilla Johnson de 30 cm. de diámetro y 8 m. de longitud, antes de colocarla en un pozo en Beloit, Wisconsin.
(Cortesía de Allabaugh Well Company)

Cuando no se puede usar el método de retracción, la rejilla se coloca siguiendo los pasos indicados en la Fig. 218. El agujero se perfora hasta la profundidad estipulada del pozo. Mientras se perfora, se toman muestras de la formación, para determinar el

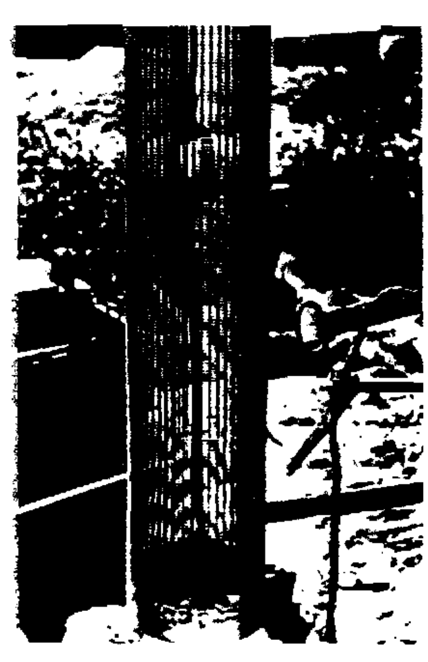


Fig. 213: El gancho fijado al asa, permite suspender la rejilla del cable de la cuchara, mientras se hace descender por dentro del ademe del pozo.

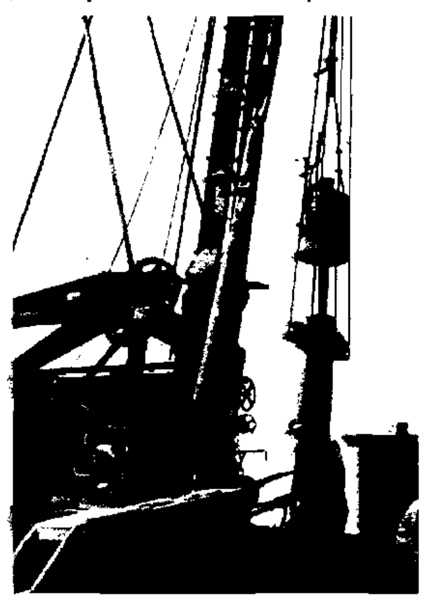


Fig. 214: Uso del bloque golpeador para halar el ademe y dejar expuesta la rejilla en el acuífero.
(Cortesía de Bergerson-Caswell, Inc.)

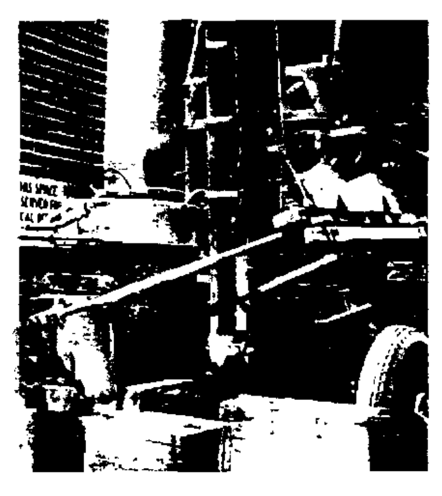


Fig. 215: Un par de gates hidraulicas actuando contra una abrazadera con cuñas, para retraer un ademe de 30 cm., una vez que la rejilla ha sido cocada por dentro de éste.

tamaño apropiado de las aberturas de la rejilla, aunque también podrían obtenerse de un agujero de menor diámetro que se perforase con antelación y luego se rimara o ampliara hasta que alcanzara el diámetro necesario del pozo definitivo. La rejilla se acondiciona con un fondo cerrado que permita izarla, o con el fondo abierto y una corta extensión de tubo, de modo que esto último permita introducirla a través de los fragmentos o cortaduras que pudieran haberse sedimentado en el fondo del agujero.

Enseguida, la rejilla se hace descender hasta el fondo del agujero por cualquier procedimiento conveniente. Si se utiliza una rejilla de fondo abierto, éste se sella luego con plomo o cemento. Posteriormente, el empaque de plomo en el extremo superior se expande por dentro del ademe.

Si la situación exige que el ademe sea cementado en el fondo, la perforación se lleva únicamente hasta la profundidad a que el ademe va a ser instalado permanentemente. Después, el ademe se hace descender y se efectúa la cementación conforme se requiera. Se usa entonces un barreno de diámetro apenas suficiente para que pase por dentro del ademe y se perfora la formación productora por debajo de éste, permitiendo así la instalación de la rejilla. A continuación, se hace descender una rejilla de tipo telescópico por dentro del ademe hasta que penetre en el agujero inferior; se elimina el fluído de perforación, se expande el empaque de plomo, y se empieza a desarrollar el pozo.

Ciertas condiciones impiden a veces o hacen que sea inconveniente halar el ademe como lo exige el método de retracción. La excesiva fricción que desarrollan los materiales de la formación sobre la superficie del ademe demanda la aplicación de una fuerza muy grande; o los movimientos del ademe podrían alterar el sello sanitario colocado alrededor de éste. En tales casos, puede utilizarse el método de achicamiento para colocar la rejilla. El primer paso consiste en perforar y, luego, instalar ademe hasta la profundidad a que éste debe quedar en posición permanente.

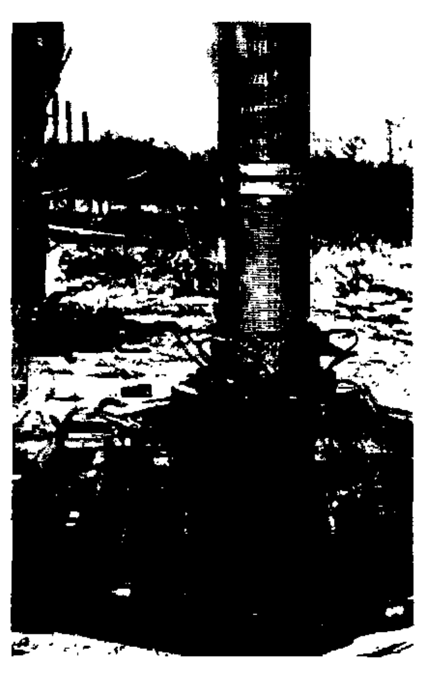


Fig. 216: Introduciendo una rejilla Johnson en un pozo de 40 cm. Los tramos de rejilla han sido armados mediante soldadura en sitio.

Cuando se perfora por el método de percusión, el ademe queda firmemente sostenido por la fricción de su superficie contra las formaciones en las cuales ha sido hincado. Cuando se perfora por el método rotatorio, el ademe se fija en su posición definitiva mediante una cementación o cualquier sellado que se efectúe en el agujero. Si se usa la cementación, el tapón es eliminado del extremo inferior del ademe antes de proseguir con la instalación de la rejilla.

A continuación, se puede perforar un

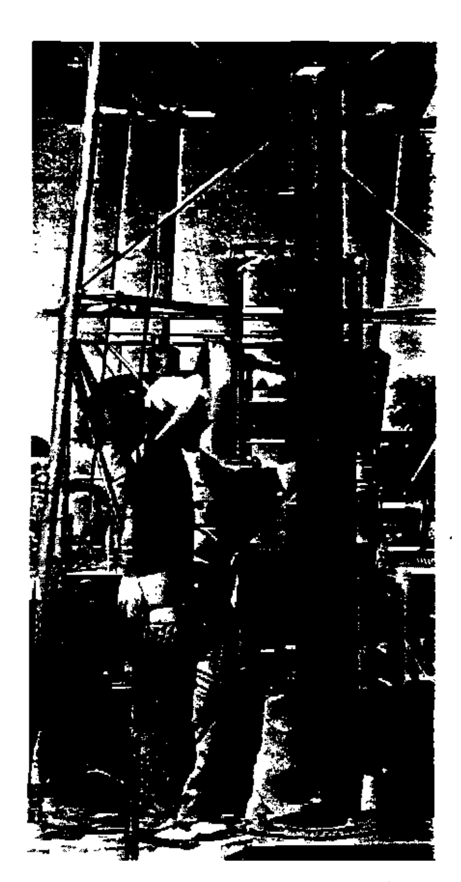


Fig. 217: Rejilla Johnson de 20 cm. de diámetro, fijada a una sarta de ademe de 20 cm., al instalarla en un agujero perforado por rotación.

agujero piloto por debajo del extremo inferior del ademe y así obtener muestras de la formación acuífera que permitan establecer su espesor. El agujero piloto sirve también para verificar la presencia de cantos, guijarros u otros obstáculos.

Si se utiliza el método de percusión, la perforación del agujero piloto se lleva a cabo por dentro de un ademe de menor diámetro, introducido concéntricamente por el ademe permanente. Esta tubería se retira una vez que la perforación del agujero piloto ha sido concluida.

Método de Achicamiento

La rejilla de pozo, acondicionada en su extremo inferior con una zapata de extracción o con una manga abierta, se hace descender por dentro del ademe, en forma telescópica. Si se usa una zapata de extracción o de achicamiento con accesorios conectores especiales, tal como se muestra en la Fig. 219, la rejilla se suspende de una sarta de tubería denominada tubería de extracción.

El dispositivo completo se hace descender hasta la formación que se encuentra por

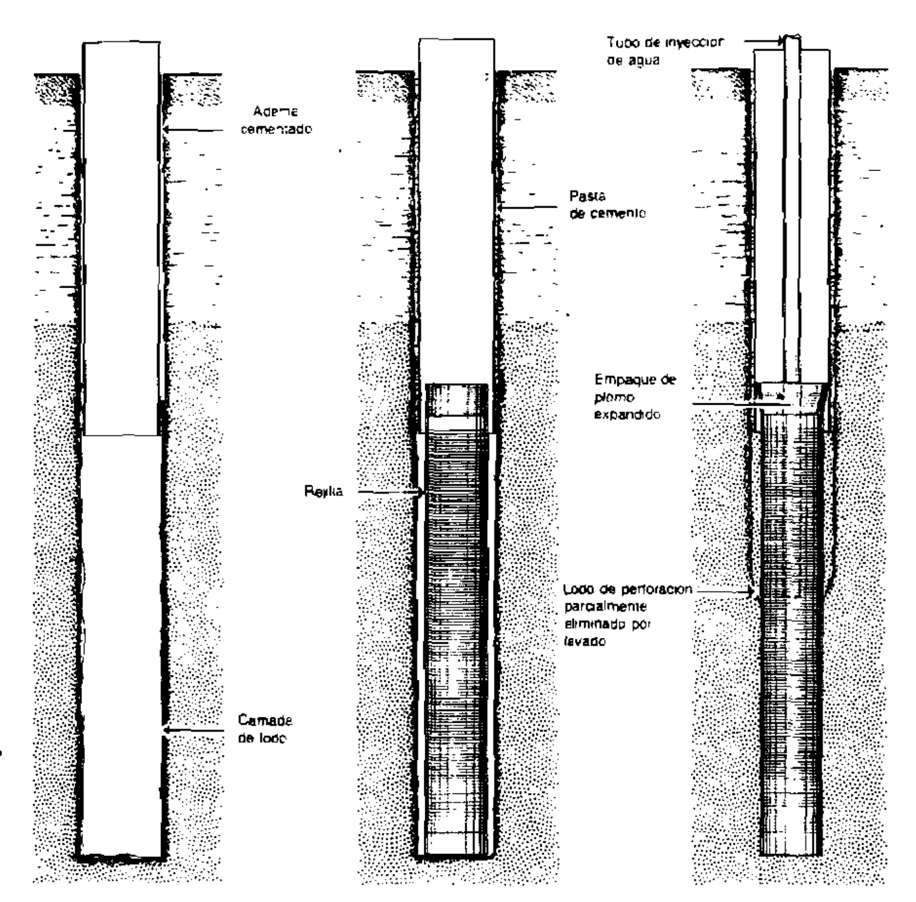


Fig. 218: En lugar de usar el método de retracción, la rejilla puede colocarse dentro de un agujero abierto, perforado por el método rotatorio, una vez que el ademe haya sido cementado *en su posición permanente.*

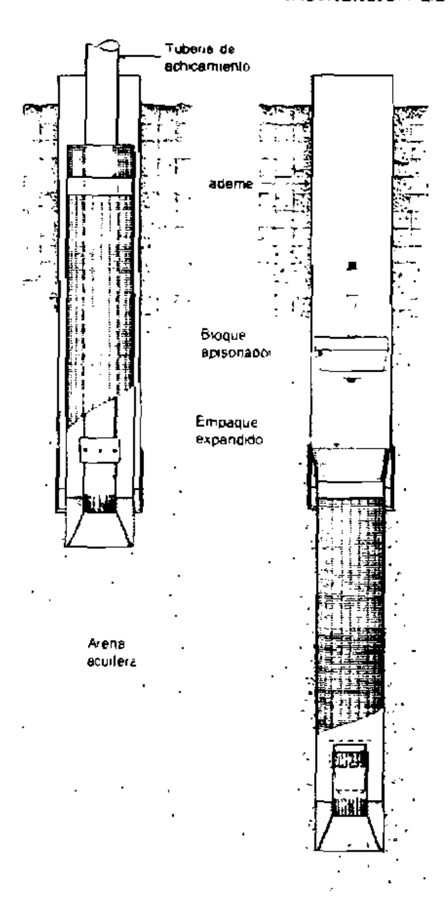


Fig. 219: (Izquierda) Disposición de rejilla y accesorios de achicamiento, *para dar comienzo a* la operación, y (derecha), etapa final de la instalación de la rejilla por el método de achicamiento.

debajo del ademe del pozo, mediante las herramientas de perforar y la zapata extractora y por dentro de la rejilla o de la tubería de extracción, según sea el caso.

El objetivo que se persigue con el método de achicamiento, es el de desplazar y remover la arena que se encuentra por debajo de la rejilla, de modo que ésta se asiente conforme la arena es desplazada. El peso que proporciona la tubería de extracción ayuda a que la rejilla se asiente cuando el peso de ésta, por sí sola, es insuficiente.

Cuando la rejilla ha sido introducida hasta la profundidad que se desea, se deja caer por dentro de la tubería de extracción un tapón pesado de madera o de plomo, para que se asiente en el niple o manguito extra resistente colocado por encima de la zapata extractora. Enseguida se desconecta la sarta completa de tubería de extracción, dándole vuelta varias veces, a la derecha, para desacoplar la unión de rosca izquierda que se halla en el extremo superior del niple. Una vez que se ha retirado la tubería de extracción, se procede a expander el empaque de plomo con la herramienta recalcadora o apisonadora, y el pozo se encuentra listo para su desarrollo.

En lugar de las conexiones de rosca izquierda en la tubería de extracción, algunos perforadores prefieren un manguito

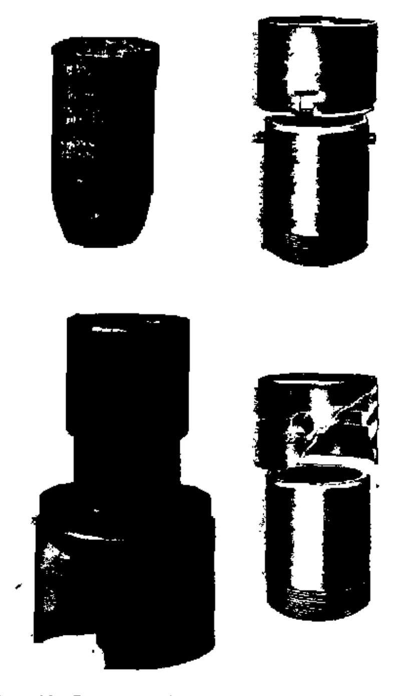


Fig. 220: Zapata achicadora o extractora, con tres tipos de accesorios de acople y tapón pesado de madera.

o niple de extremos lisos y un acople de enchufar. Algunos otros prefieren una conexión del tipo de bayoneta o de pasador.

Algunos perforadores colocan las rejillas en su lugar mediante procedimiento que se acaba de describir, pero utilizan un succionador neumático para remover la arena que se encuentra por debajo de la rejilla. En este caso, debe hacerse bajar una tubería de aire por dentro del tubo de extracción. En esta forma, la tubería de extracción se convierte en la descarga o tubo eductor del succionador neumático.

Cuando una rejilla se hace descender por el proceso de achicamiento, es aconsejable proseguir con el trabajo tan ininterrumpidamente como sea posible. Si hay que detener la labor durante cierto periodo de tiempo, la arena de la formación podría compactarse alrededor de la rejilla y causar tal fricción que impida posteriores movimientos descendentes de la rejilla.

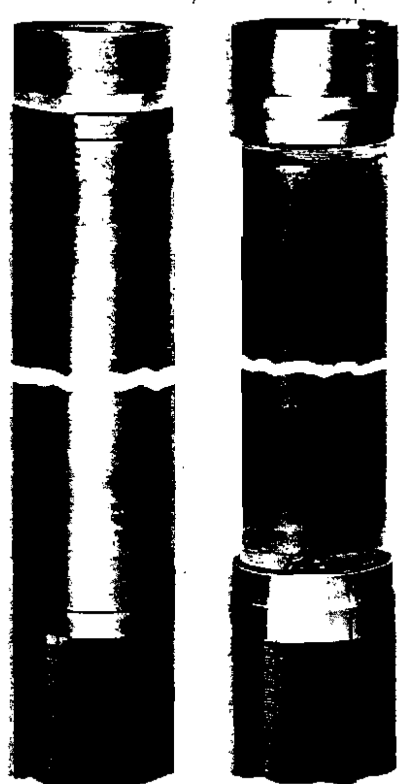


Fig. 221: Los tramos ciegos entre la rejilla y el empaque de plomo, pueden consistir de manguitos enchufados o de tubo del diámetro más próximo de tubería de acero, enroscados o soldados a la rejilla.

Tabla XXVII
Tamaños de Tubería para el Proceso de Achicamiento

Dimensiones en Pulgadas		
Rejillas de Tamaño Telescópico	Rejillas al Tamaño de la Tubería	Máximo Tamaño de la Tubería de Extracción (IP)
4-inch	3-inch	2
5-inch	4-inch	2½
6-inch	5-inch	3½
8-inch	6-inch	5
10-inch	8-inch	6
12-inch	10-inch	8
16-inch	14-inch	10
18-inch	16-inch	12

Si se encuentra grava gruesa, resulta imposible del todo continuar con este procedimiento. Deberán entonces introducirse herramientas de perforación por dentro de la tubería de extracción para perforar por debajo del extremo inferior de la rejilla e ir aflojando el material grueso o desmoronando los guijarros. Cuando se perfora con antelación, la rejilla deberá mantenerse en posición.

Tabla XXVIII
Accesorios Extremos de Rosca, para Rejillas del Tipo Teléscópico

Dimensiones en Pulgadas		
Diametro Nominal de la Rejilla	Diametro Exterior de la Rejilla	Tamaño de Conexion de la Tubería
3	2½	2
4	3¾	3
5	4¾	4
6	5⅝	5
8	7½	6
10	9½	8
12	11¼	10
14OD	12½	12
1600D	14½	14OD

NOTA: OD = Diámetro Exterior

asegurando la tubería de extracción a la superficie del terreno.

Si las muestras de la formación que se obtengan de un pozo de investigación o de un pozo piloto indican que a la profundidad a que se va a colocar la rejilla no existe arcilla firme o roca en donde pueda asentarse ésta, se recomienda preveer alguna tolerancia por cualquier colocación errónea. Para ello, se provee en el extremo superior de la rejilla una extensión de tubo ciego con un empaque fijado a éste.

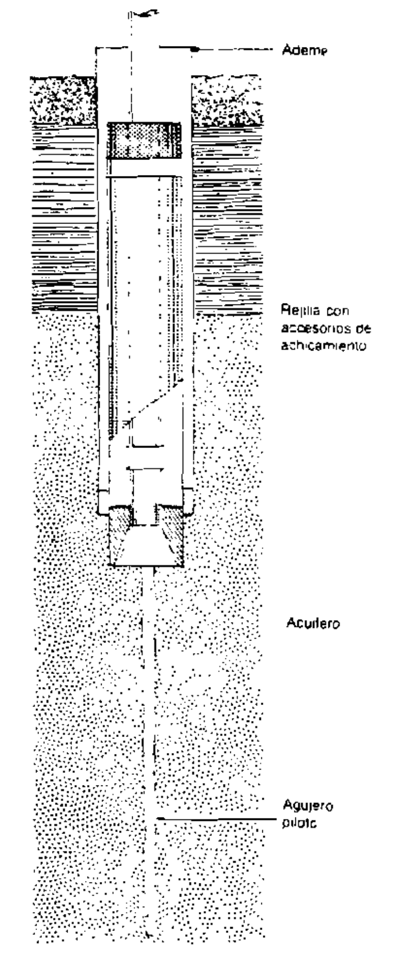


Fig. 222: El agujero piloto, perforado dentro del acuífero antes de empezar a instalar la rejilla, facilita la colocación de ésta cuando se emplea el procedimiento de achicamiento.

En ocasiones se presentan dificultades cuando no se puede limpiar el fondo de la tubería de extracción o de la rejilla, por la presencia de arena en suspensión que aparece una vez que aquélla se ha llevado hasta la profundidad que se desea. Si se llena la tubería de extracción con agua, se evita, por lo general, que la arena entre en suspensión, de modo que pueda instalarse el tapón del fondo. Si lo anterior no resulta efectivo, tanto el pozo como la tubería de extracción pueden llenarse de una pasta arcillosa que proporcione un fluido más denso y una presión mayor para contrarrestar la tendencia de la arena, a levantarse.

Perforación Piloto

Antes de colocar una rejilla por el método de achicamiento, resulta conveniente perforar un agujero piloto de pequeño diámetro a través de la formación, tal como se muestra en la Fig. 222. La ventaja de ello es la de que permite tomar muestras comprobatorias de la formación, para

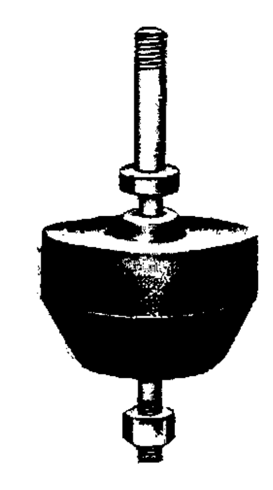


Fig. 223: Bloque para recalcar o apisonar que se emplea para expander el empaque de plomo y que generalmente se utiliza como accesorio de la parte superior en las rejillas de tipo telescópico.

compararlas con las obtenidas en la perforación original de muestreo. La segunda ventaja que se obtiene consiste en que la presencia del agujero piloto acelera la operación de achicamiento.

Para perforar el agujero piloto por el método de percusión, se hace bajar por dentro del ademe una sarta de tubería de un diámetro menor. Esta tubería, de ser posible, se hace penetrar dentro de la formación, mediante achicamiento. Debe evitarse el hincar la tubería más de lo absolutamente necesario. Esta sarta es luego retraída, y la rejilla, acondicionada con todos los accesorios de achicar, se hace descender por dentro del pozo, dando comienzo, tan pronto como sea posible, a la operación de achicamiento. El agujero piloto no permanece libre, pero el núcleo de material suelto que se obtiene como resultado de haber perforado este agujero, facilita la introducción de la rejilla.

Cuando se utiliza el método rotatorio, el agujero piloto se perfora dentro de la formación, por debajo del extremo inferior del ademe, antes de que éste haya sido cementado en su posición permanente. Se utiliza para ello un trépano de pequeño diámetro. Cuando se concluye la perforación, las herramientas pueden halarse hacia arriba por dentro del ademe, y el fluído o lodo de perforar contenido en el ademe es desplazado de éste, haciendo circular agua limpia.

La rejilla con los accesorios necesarios se hace descender dentro del pozo y se empieza con la operación de achicamiento.

Cabe observar que el uso de rejillas del tipo telescópico permite que éstas sean retiradas y sustituídas, si fuese necesario, sin que ello afecte el sello a prueba de agua colocado por fuera del ademe del pozo. Este sello constituye una protección sanitaria importante, por lo que debe tenerse muy en cuenta. Aunque el método telescópico de instalar rejillas se desarrolló originalmente para adaptarse a un tipo particular de perforación de pozos, se ha convertido en el sistema más práctico para aplicarlo a cualquier pozo, no importa qué método de perforación se haya empleado.

Rejillas de Fondo Abierto

En aquéllas rejillas menores de 15 cm. de diámetro, y cuando se desea introducir una cuchara del mayor tamaño posible, el extremo inferior de la rejilla puede acondicionarse con una manga abierta o un corto tramo de tubería piloto. En algunas oportunidades, la rejilla se asienta por su propio peso, conforme la cuchara de extracción desplaza la arena que se encuentra por debajo. A menudo es necesario hacer descansar sobre la rejilla una sarta de tubería para proporcionarle un peso adicional. El extremo inferior de esta sarta de tubos puede acondicionarse con cierto acople o con una brida que asiente uniformemente sobre el empaque sin deformarlo.

El taponamiento del extremo abierto inferior de una rejilla, o de la abertura de una zapata de achicamiento o extracción, puede realizarse de diversas maneras.

Puede dejarse caer un tapón pesado de madera a través de la rejilla y por dentro de la manga corta o tubo piloto colocado en el fondo. Este tapón debe ser de un tamaño ligeramente menor que el diámetro del niple de tubería, por lo que se hace necesario proveer un sello adicional para evitar la filtración de arena. Para ello, se apisona algodón de plomo en la parte superior del tapón; o también pueden dejarse caer bolsas de pasta de cementación, que se compactan en la parte superior del tapón de madera mediante un ligero apisonamiento aplicado por una herramienta adecuada.

Se puede utilizar solamente algodón de plomo, sin que se necesite el tapón, para taponar el fondo abierto de una rejilla. Este se introduce en el pozo, después de formar paquetes de tamaño apropiado; también se

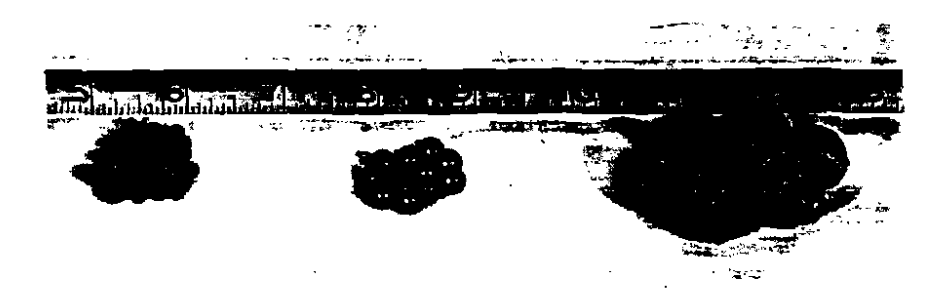


Fig. 224: Balines y algodon de plomo que se utilizan para taponar el fondo abierto, después de colocar la rejilla en su posición final.

pueden utilizar pastillas de algodón de plomo de 2.5 a 5 cm. de diámetro, que se dejan caer dentro del tubo piloto situado por debajo de la rejilla. Estas se compactan luego, para formar así un tapón efectivo.

Pueden colocarse bolsas de mortero en su sitio, para constituir un tapón de cemento. La mezcla de cemento deberá ser relativamente seca y luego colocarse en pequeñas bolsas. Una vez que se hayan dejado caer varias bolsas de material hasta el fondo del pozo, se utiliza una herramienta que las rompa y las compacte hasta formar un tapón. Una vez sumergida, la mezcla de cemento absorbe agua. Debe tenerse cuidado de no mezclar excesiva agua con la pasta, cuando se está compactando.

Pueden utilizarse asimismo pesados balines de plomo para taponar el fondo abierto de la rejilla o la abertura de la zapata de extracción. Simplemente se vacian varios kilos de balines hasta formar una capa de 10 a 20 cm. en el fondo del pozo. Si la formación consiste de arena fina, pueden utilizarse también balines de menor tamaño, para que se introduzcan en los espacios de los más grandes.

Método de Lavado o de Chorro

La Fig. 226 muestra los detalles fundamentales del método de lavado o de chorro para la instalación de una rejilla de pozo. Primero se coloca el ademe hasta la profundidad que se desea, tal como se describió al tratar el método de achicamiento. En la Fig. 226 se muestra cómo el tapón de cemento en el ademe cementado en el agujero previamente perforado, es taladrado una vez que la cementación ha fraguado.

Con el ademe colocado en su lugar, se puede perforar un agujero de pequeño diámetro a través de la formación subyaciente, para obtener muestras, o simplemente para exploración, tal como se ha descrito.

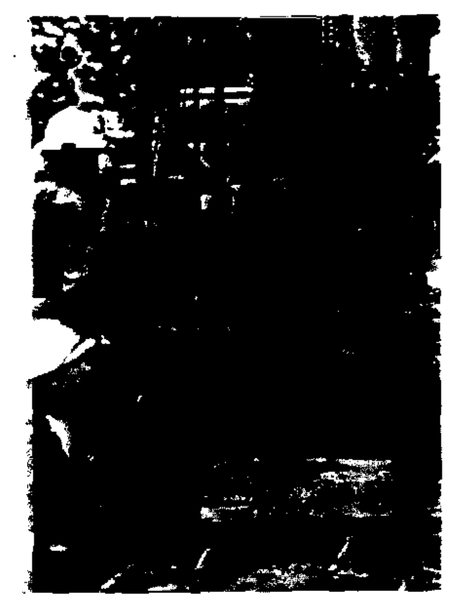


Fig. 225: Fondo abierto de una rejilla de pozo, y la tubería de extensión que sirve como zapata o piloto.

La rejilla se acondiciona con un fondo de cierre automático, al cual se conecta una sarta de tubería (usualmente tubería de perforación) la que a su vez se usa como conducto de lavado. La rejilla se hace descender por dentro del ademe y se bombea entonces lodo de perforación de poca densidad, a través de la tubería de lavado. Se necesita una bomba que suministre una presión bastante alta, para producir un chorro de fluido de gran velocidad, que pase a través del cierre automático instalado en el fondo. La acción del chorro afloja la arena y permite que la rejilla se asiente. La arena es llevada hacia arriba en derredor de la rejilla y sale por dentro del ademe junto con el flujo de retorno del fluido.

Algunas de las partículas más gruesas se devuelven inevitablemente hacia el interior de la rejilla, puesto que la velocidad ascendente del fluido disminuye repentinamente a la altura justamente del empaque de plomo.

Cuando la rejilla ya se halla en su posición final, es casi seguro que se encontrará parcialmente llena de arena. Cuando aquélla descansa en el fondo, debe bombearse agua limpia a través del conducto de lavado y continuar con la circulación a velocidad más reducida, para eliminar cualquier costra de lodo que se hubiese formado en la pared de la rejilla durante la operación a chorro. Es esencial que la formación se derrumbe alrededor de la rejilla para que ésta quede aprisionada y pueda desenroscarse la tubería de lavado.

En aquellos pozos perforados por el sistema rotatorio, constituye una práctica muy generalizada, la colocación simultánea de la rejilla y del ademe, manteniéndolos acoplados, en lugar de introducir la rejilla por dentro del ademe como en el método telescópico. En esta forma, puede que solamente haya necesidad de usar una línea de tubería o el sistema puede necesitar una segunda tubería de tamaño mayor, que corrientemente se denomina ademe superficial. Este ademe se extiende hacia abajo, lo suficiente nada más, para evitar la contaminación proveniente de la superficie: en otros casos, sin embargo, se lleva hasta un poco más abajo: por lo general, hasta el nivel estático del agua.

El agujero se perfora antes de armar la sarta combinada de rejilla y ademe. Es necesario proveer algún tipo de mecanismo de achicamiento o lavado que pueda remover los fragmentos o cortaduras y el lodo pesado del fondo del agujero. Puesto que la circulación de fluido es por lo general más conveniente que el achicamiento, la rejilla y el ademe son corrientemente colocados en su sitio utilizando algún

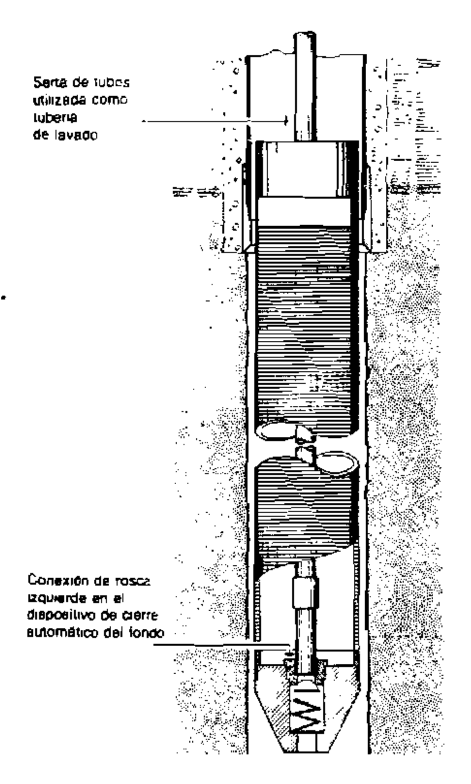


Fig. 226: Dispositivo de fondo con la válvula de resorte que permite instalar rejillas por el método de lavado o de chorro. El espacio que queda alrededor del empaque de plomo hace que el flujo de retorno pase por el exterior de la rejilla.

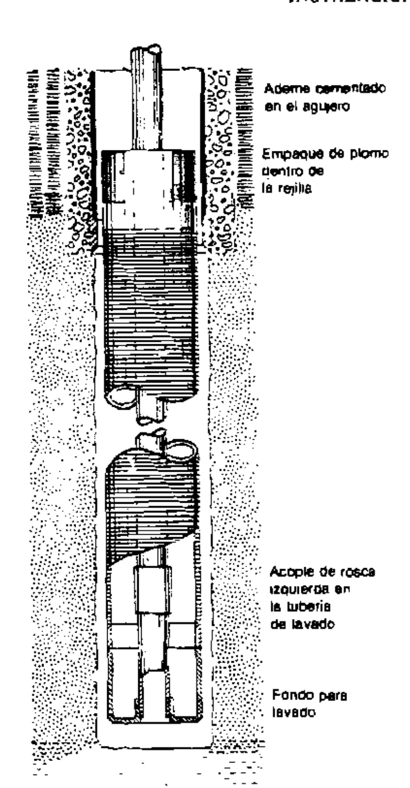


Fig. 227: Diseño sencillo de un fondo para lavado, sin válvula.

accesorio de lavado instalado en el fondo de la rejilla.

Cuando se trata de pozos pequeños con profundidades de hasta unos 120 m., se fija por lo general la rejilla directamente al ademe. En estos pozos la operación de lavado, aunque no absolutamente necesaria, se prefiere por lo general debido a las mismas razones por las cuales se emplea cuando se instalan rejillas en pozos más grandes.

Un esquema de procedimiento que resulta adecuado para pequeños pozos, es el que utiliza una tubería provisional de lavado provisional, que se arma por dentro de la rejilla, antes de acoplar ésta a la unión de fondo en el ademe. Esta tubería de lavado, que corrientemente consiste de un tubo de 75 mm. de diámetro, se extiende desde la rejilla, y por dentro del ademe, hasta unos 0.90 ó 1.20 m. sobre el extremo superior de aquélla. Una unión enroscada en el extremo inferior de la tubería de lavado, se hace descansar sobre un asiento cónico fijado al aditamento extremo de lavado que va unido a la rejilla. Este accesorio, llamado algunas veces válvula de contrapresión, está dotado de un cierre plástico de esfera y de un vaciado cónico que sirve de asiento a la tubería de lavado, y está diseñado especialmente para este método de instalación de rejillas.

Un sello anular, construido de material plástico semi rígido, se hace deslizar por

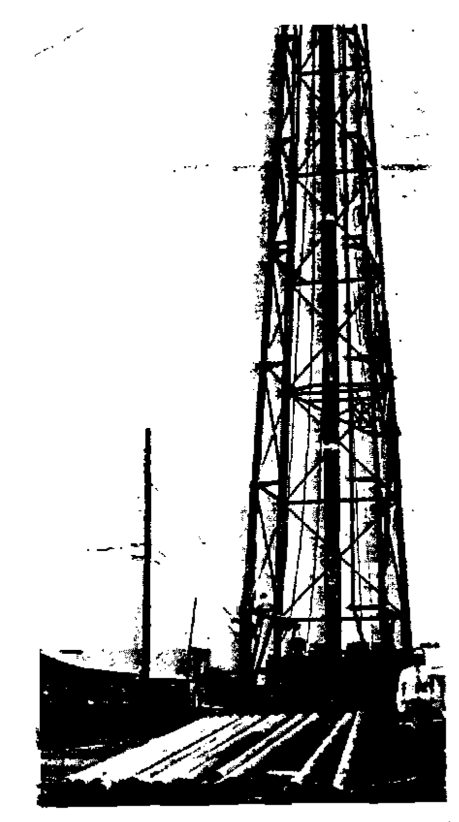


Fig. 228: Rejilla Johnson de Acero Inoxidable acondicionada con un fondo de lavado de cierre automático, lista para ser instalada en un pozo municipal de Lafayette, La.

(Cortesía de Stamm-Scheele, Inc.)

sobre la tubería provisional de lavado y se **empuja hasta** que llegue al extremo superior **de la rejilla**, para así cerrar el espacio abierto que queda entre ésta y la tubería provisional de lavado. Seguidamente, se conecta una **unión al extremo** superior de la tubería de lavado.

La Fig. 229 muestra los detalles de la disposición descrita y el sentido de la circulación del agua cuando se aplica el chorro. El sello anular evita cualquier devolución de flujo del chorro de agua por el espacio comprendido entre la tubería de lavado y la rejilla. Todo el flujo de retorno de la operación de lavado a chorro tiene lugar por fuera del ademe y de la rejilla.

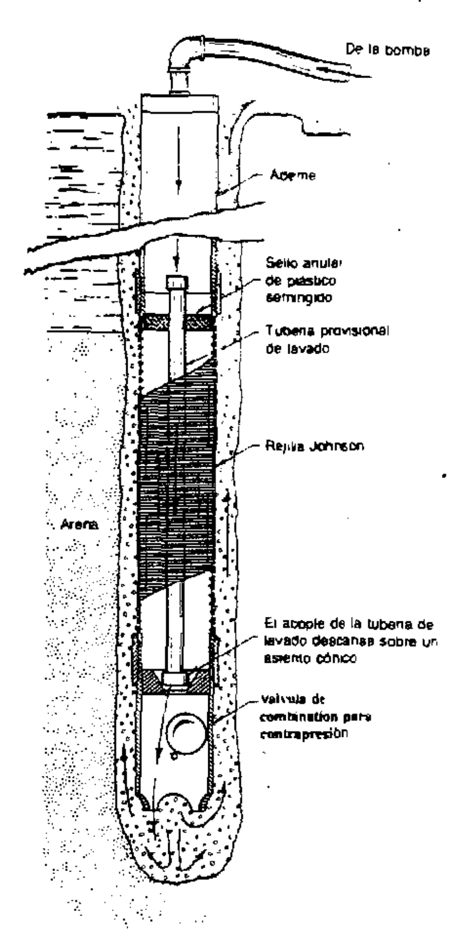


Fig. 229: Las rejillas de pequeño diámetro pueden instalarse por el procedimiento de lavado, inyectando un chorro de agua a presión a través de una tubería provisional y mediante un fondo de lavado con una válvula de esfera flotante.

El agua que se bombea dentro del ademe entra a la tubería de lavado y sale en forma de chorro a presión a través del dispositivo de fondo. En formaciones arenosas, la acción del chorro hará que la sarta de ademe y rejilla vaya penetrando dentro del acuífero. En estas condiciones, la rejilla puede emplazarse en la posición que se desea sin necesidad de haber perforado previamente, a base de lodo, un agujero dentro de esa parte de la formación. Como se necesita por lo general mantener una circulación estacionaria del fluído, el límite satisfactorio de penetración por este sistema resulta ser *aproximadamente igual a la longitud de un* tramo de tubería de ademe.

Una parte del agua inyectada, quizá un 5 por ciento de la cantidad que se está bombeando, se filtra por la periferia del fondo en la tubería de lavado y se escapa hacia afuera por las aberturas de la rejilla. Esto se hace adrede para evitar que la arena fina pase hacia la rejilla durante la operación. Si se mantiene un pequeño y contínuo flujo de agua hacia afuera de las aberturas de la rejilla, se reduce la posibilidad de que la arena atasque la tubería de lavado que se halla por dentro de aquélla.

Cuando la rejilla ha descendido hasta la posición requerida, la tubería de lavado se retira del pozo, extrayéndola mediante alguna herramienta de pesca. Conforme la tubería se va levantando, el acople de su extremo inferior arrastra consigo el sello anular superior, de manera que la tubería y el sello son extraídos conjuntamente.

La esfera plástica cierra efectivamente el orificio del dispositivo de fondo para lavado. Esta esfera está hecha de un material plástico rígido, lo suficientemente liviano para que apenas flote en el agua. Tan pronto como la inyección cesa, la esfera flota, desplazándose hacia arriba y cerrando la abertura de la válvula. Este diseño tiene varias ventajas sobre otros tipos de válvulas de contrapresión.

Una vez que la tubería de lavado ha sido retirada, el pozo puede ser desarrollado por pistoneo contra lavado u otro tipo de agitación.

Si el agujero ha sido perforado dentro de la formación hasta la profundidad completa que vaya a tener el pozo, el dispositivo de fondo para lavado se usa con la rejilla, pero se puede omitir el empleo de la tubería de lavado. En ausencia de ésta, parte del agua que se bombea hacia abajo a través del ademe fluye por las aberturas de la rejilla. Sin embargo, la mayor parte del flujo continúa hasta el fondo de la rejilla y descarga por la válvula de contrapresión. El flujo a través de la válvula causa suficiente acción de lavado, que afloja los fragmentos y cortaduras del fondo del agujero perforado, y en esta forma la rejilla desciende fácilmente hasta la posición que se desea.

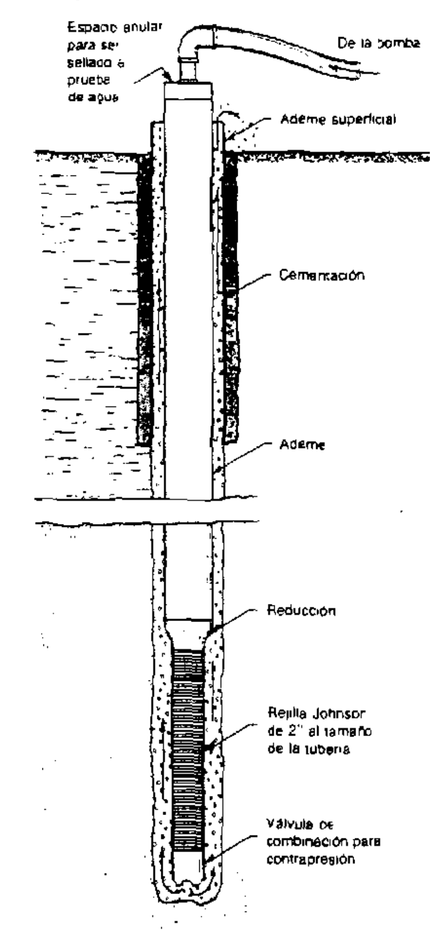


Fig. 230: Circulación de agua o de fluído de perforación, a través de una sarta de ademe y rejilla, acondicionada con un dispositivo de fondo para lavado y válvula de flotador del tipo de esfera.

El diseño del dispositivo de fondo para lavado, con su esfera flotadora, permite trabajar sin necesidad de la tubería de lavado, ya que ofrece una resistencia muy pequeña al paso del agua. La presión que se requiere para abrir una válvula de resorte es tal que la mayor parte del agua es obligada a salir por las aberturas de la rejilla y muy poca o ninguna es descargada por debajo de ésta para lavar las cortaduras, a menos que la tubería de lavado se extienda por dentro de la rejilla.

Uso del Estabilizador de la Formación

Muchos perforadores han encontrado que constituye una buena práctica introducir cierta cantidad de arena en el espacio anular que rodea al ademe y a la rejilla del pozo, antes de dar comienzo a las operaciones de limpieza. En el verdadero sentido de la palabra, esto no corresponde a un filtro de grava, sino que se conoce como un estabilizador de la formación. Su propósito es el de reducir la posibilidad de un colapso repentino de la formación arenosa alrededor de la rejilla y el desprendimiento de costras de material sobreyaciente que podría caer en el espacio anular. La arena que se emplee para este propósito deberá ser limpia y de partículas redondeadas. La gradación debe ser similar a la de la formación; también puede ser más fina, de modo que una buena parte sea eliminada, durante el desarrollo, a través de las aberturas de la rejilla. En las páginas 231 y 232 (Capítulo 10) se dan alguno

otros detalles concernientes a las ventajas del estabilizador de la formación.

El estabilizador puede colocarse de diversas maneras, inclusive arrojándolo desde la superficie. La segregación de los tamaños, y ciertos vacíos que se puedan formar, no constituyen ningún problema en el acabado del pozo. La única precaución de importancia que se debe de tomar, es la de evitar que queden muchos vacíos sobre la rejilla, lo que haría que la arena no llene en su totalidad el espacio que la rodea. Quizá el mejor procedimiento consista en invertir la circulación del fluido dentro del pozo mientras se introduce el estabilizador. Deberá introducirse agua junto con la arena alrededor del ademe mientras se bombea del interior del pozo.

No se necesitan guías centradoras para colocar la rejilla en el agujero. También carece de importancia la posibilidad de que el estabilizador no llegue a rodear completamente la rejilla. Cuando se han escogido las aberturas de la rejilla para un pozo que se vaya a desarrollar en forma natural, éste siempre podrá llevarse hasta una condición de total ausencia de arena, aunque sólo se logre que el material de relleno envuelva parcialmente a la rejilla.

Instalación de Punteras

Las punteras se instalan a menudo dentro de los pozos perforados mediante algunos de los mismos procedimientos que ya se han descrito en el caso de rejillas de tamaño mayor. Cuando se utiliza el método de la retracción del ademe, éste se coloca primero a la profundidad total mediante perforación, hincado o achicamiento. En el extremo superior de la puntera, se enrosca una pieza hecha al torno o un empaque adecuado. Seguidamente, la puntera se deja caer por dentro del ademe hasta que alcance el fondo del agujero. Posteriormente, el ademe es retraído para dejar expuesta la rejilla dentro del acuífero.

A veces es necesario dejar que las herramientas de perforación descansen por sobre la puntera mientras se hace subir el ademe. Si la arena en suspensión dificulta la limpieza del ademe hasta el fondo, deberá llenarse de agua el pozo para contrarrestar el efecto ascendente de aquélla, mientras se coloca la rejilla. Deberán tomarse mediciones precisas y cuidadosas para asegurarse de que el ademe haya sido retraído en la distancia justa. Si se emplea una pieza torneada en el extremo superior de la puntera, se provee de este modo un collar que se adapta ajustadamente al ademe. De esta manera, podría instalarse fácilmente sobre la pieza mencionada una válvula de retención con empaque de hule.

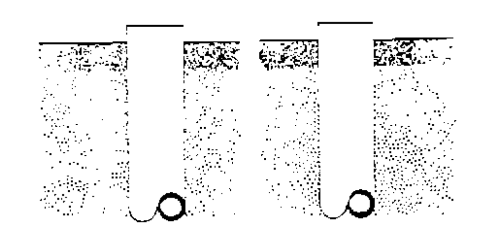
En los pozos de 10 cm. de diámetro, se usan algunas veces punteras de Everdur y de acero inoxidable de 5 cm. de diámetro. Para este fin, se fija al extremo superior de la puntera, un empaque de cierre automático de 10 cm. de diámetro, o uno de plomo del mismo diámetro. Si se usa éste último, se debe de expander por dentro del ademe, una vez que éste es retraído, para dejar expuesta la rejilla dentro del acuífero.

El método de retracción no se puede utilizar algunas veces, porque la fricción sobre la tubería es tan grande que la fuerza que habría que ejercer para moverla podría reventarla. En tal caso, se puede hincar una puntera dentro de la formación, por debajo del extremo inferior del ademe. Desde luego, el perforador debe conocer si la formación acuífera se extiende lo suficiente por debajo del ademe como para que se puede efectuar la instalación por este procedimiento.

El ademe se limpia cuidadosamente hasta el fondo, de manera que la puntera no quede aprisionada por la arena. Si la arena tiene la tendencia a ascender, se mantiene entonces el pozo lleno de agua mientras se instala la rejilla. Se deja caer dentro del ademe la puntera, acondicionada con la pieza torneada o con el empaque de cierre automático. Para que la puntera penetre hasta el fondo del

ademe, se utiliza una barra de perforación, una barra de peso, o alguna otra herramienta parecida, la cual se hace subir y bajar. Si la perforación se realiza por el método de la barra hueca, la sarta constituida por éstas se usa como peso de hincado. El perforador deberá tomar medidas cuidadosas para cerciorarse de que la puntera se ha hincado hasta la profundidad requerida.

La Fig. 233 se refiere a otro procedimiento, que permite aplicar la fuerza necesaria para hincar la puntera directamente sobre el extremo sólido de ésta. A menudo se prefiere este método cuando se están hincando punteras relativamente largas. Para aplicar la fuerza, deberá emplearse una barra sólida de 2 cm. de diámetro en el caso de las punteras de 3 cm. y una de 4 cm. en aquéllas de 5 cm. Para suministrar el peso requerido, se echa mano de una sarta de tubería o de una barra. En lugar de la pieza torneada, se puede usar un empaque de plomo u otro de cierre automático, colocado en el extremo superior de la puntera. Al igual que en el método de retracción, las punteras de 5 cm. de Everdur y de acero inoxidable, con empaques de 10



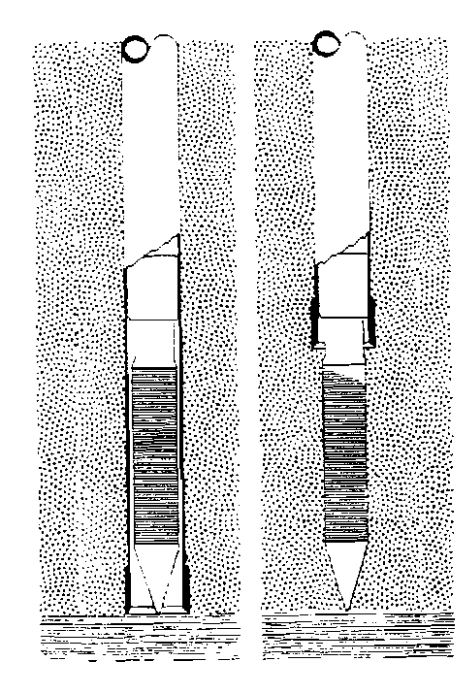


Fig. 231: La puntera se puede colocar dentro de un pozo de pequeño diametro mediante el procedimiento de retracción del ademe.

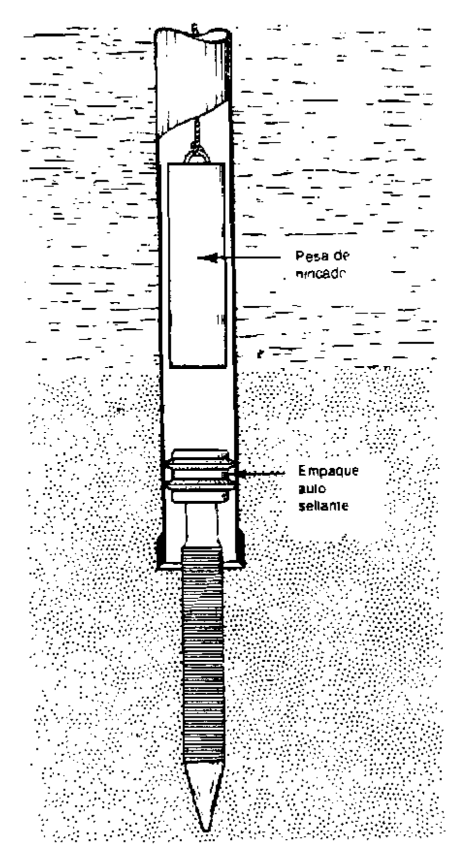


Fig. 232: Una puntera, provista de su empaque de cierre automático, puede hincarse en el acuífero, por debajo del extremo inferior del ademe.

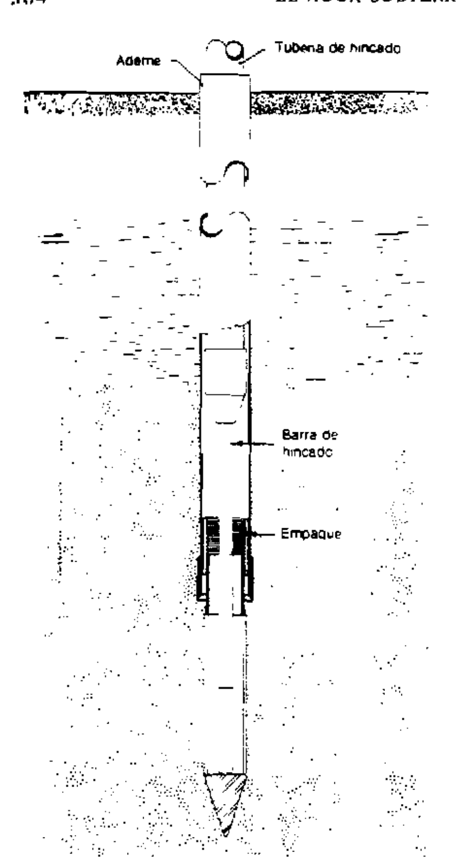


Fig. 233: La barra para hincar, que transmite la fuerza directamente al fondo sólido de la puntera, resulta muy útil cuando se clavan punteras de 1.50 m. de longitud o mayores.

cm., pueden instalarse fácilmente en pozos de 10 cm. de diámetro.

Los detalles referentes a otros métodos de instalación de punteras en pozos someros se dan en los Capitulos 11 y 13.

Los métodos de instalación de rejillas que se han descrito antes se refieren ante todo, a los pozos que se desarrollan en forma natural. Los elementos de diseño para pozos desarrollados naturalmente, se describen en las páginas 212 a 222 (Capítulo 10).

Pozos con Filtro Artificial de Grava

Un pozo acondicionado con un filtro artificial de grava, difiere de otro que haya sido desarrollado naturalmente, en que en el primero se coloca una envoltura alrededor de la rejilla, formada por arena o grava de gradación especial, en un intervalo predeterminado. Este filtro sustituye a la zona hidráulicamente gradada y de alta permeabilidad que se forma con el procedimiento convencional de desarrollo. Ambos tipos de pozos, si se han construido adecuadamente son eficientes y estables. La decisión sobre cuál sistema deberá usarse se basa en consideraciones relativas al costo y a las condiciones que se encuentren.

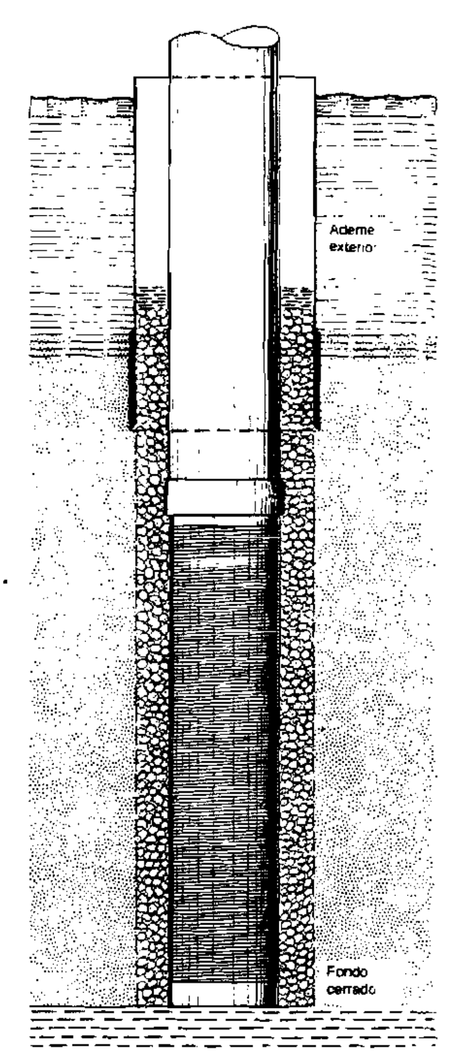


Fig. 234: Filtro artificial de grava y rejilla de pozo, instalados por el método del doble ademe. El ademe exterior se coloca primero hasta el fondo del agujero y luego se va levantando conforme la grava se coloca alrededor de la rejilla.

Los procedimientos para la instalación de rejillas en aquellos pozos dotados de un filtro artificial de grava, comprenden el centrar la rejilla dentro de un agujero ampliado y la colocación del material del filtro.



Fig. 235: Dispositivos para guiar la rejilla y que ésta quede centrada dentro del ademe exterior.

El método que emplea un doble ademe hace uso de una sarta de tubos de un tamaño correspondiente al diámetro exterior del filtro de grava, y una segunda sarta de ademe, del mismo diámetro nominal de la rejilla.

Este es el método que comúnmente se utiliza cuando se perfora mediante el método de percusión. Primero se hace descender hasta el fondo del pozo un ademe grande exterior. Luego, en forma concéntrica con éste, se colocan el ademe interior y la rejilla. A continuación, se introduce la grava seleccionada, en el espacio anular que se halla alrededor de la rejilla. Después de haber llenado unos cuatro metros con grava, se retrae el ademe exterior por una corta distancia. Este paso, de colocar más grava y

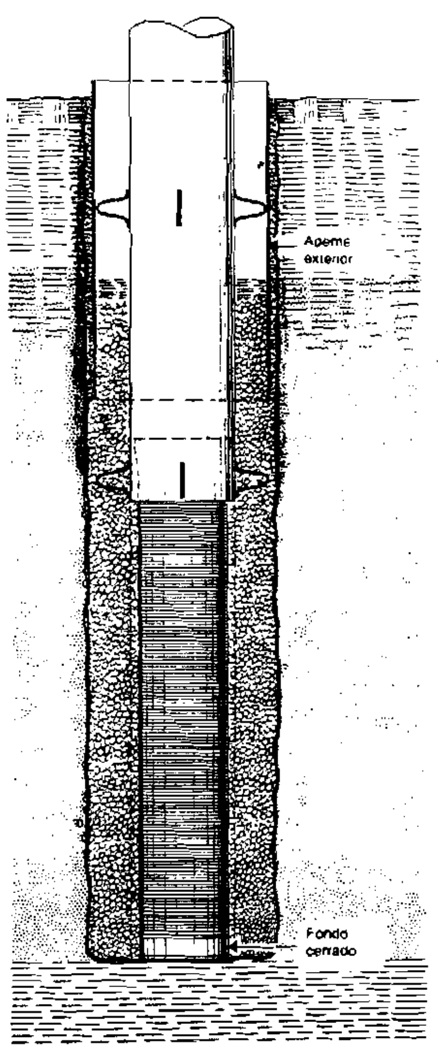


Fig. 236: Rejilla de pozo y filtro artificial de grava, instalados en un agujero perforado por el método de rotación: el ademe interior se lleva provisionalmente hasta el fondo; la rejilla se hace descender por dentro de éste, el que se retrae luego para dejar expuesta la rejilla conforme la grava se deposita en el espacio anular.

retraer el ademe. se repite hasta que el nivel alcanzado por el material del filtro se halle por encima del extremo superior de la rejilla. Seguidamente. se da comienzo a la labor de desarrollo para eliminar la arena fina contenida en la grava y limpiar la superficie de contacto entre la grava y la formación natural.

Es de esperarse que se manifieste algún asentamiento de la grava y que haya que agregar más de ésta para mantenerla a varios metros por encima del extremo superior de la rejilla.

El espacio anular por encima de la grava deberá sellarse por algún medio adecuado. El ademe exterior puede retirarse completamente, o dejar colocada una parte de éste en el intervalo próximo a la superficie.

Ya con el ademe interior colocado a la profundidad total del pozo. se puede instalar la rejilla por dentro de la tubería. a la manera telescópica. El ademe interior se va levantando conforme se deposita la grava. Si el ademe exterior va a quedar permanentemente en su lugar. el interior se puede retirar totalmente. provisto de que una extensión de tubería. conectada al extremo superior de la rejilla. traslape unos cuantos metros por dentro del ademe exterior.

Algunos ingenieros y perforadores prefieren que el ademe interior se fije permanentemente al extremo superior de la rejilla. Para ello. se disponen guías centradoras que se fijan a ésta. para poderla centrar en el agujero. El ademe interior viene entonces a convertirse en parte de la estructura del pozo terminado y sirve para acomodar la bomba.

Una sarta combinada de tubería y rejilla constituye una columna esbelta y flexible. con una relación grande de longitud a diámetro. Para una sarta de 30 cm. de diámetro y 60 m. de longitud, la relación longitud a diámetro tiene un valor de 200 que es casi equivalente a la de un pedazo de cable de achicar, de 40 cm. de longitud. Una columna de esta relación de esbeltez tiene muy poca resistencia columnar. salvo cuando se halla efectivamente apoyada por los lados. Cuando se está instalando la sarta dentro de un agujero sin que se disponga de apoyo lateral proporcionado por la formación. es preferible mantenerla suspendida desde la superficie y no hacerla descansar sobre el fondo. Tan pronto como la formación. o el filtro artificial de grava. brindan su apoyo lateral. se puede hacer descansar todo el peso de la columna. con seguridad. El no tomar esta precaución puede ocasionar torcedura del pozo

Una vez que la rejilla se halla en su posición correcta. se puede depositar el material del filtro a su alrededor

Colocación del Filtro de Grava

Un aspecto importante de la colocación de los filtros de grava es el referente al uso de un método que impida la separación de las partículas gruesas y finas que forman la mezcla gradada. Un pozo que erogue arena puede ser el resultado de la segregación de los diversos tamaños de grano. aunque el material que se haya llevado a la obra tenga la gradación apropiada.

Un filtro de grava formado por material de gradación uniforme. es menos susceptible de segregarse severamente. que otro de un material no uniforme y con amplio rango de tamaños de partículas. Las mezclas de arena y grava. con un coeficiente de uniformidad mayor que 2.5. resultan difíciles de colocar, sin que exista una separación inconveniente de sus partes fina y gruesa.

Se puede demostrar fácilmente que una partícula esférica de un diámetro dado. desciende por dentro del agua a una velocidad cuatro veces mayor que otra partícula similar de la mitad de tamaño. Suponiendo que el material de un filtro de grava tenga una gradación uniforme desde 1.58 hasta 3.16 mm., los granos de 3.16 mm., descendiendo dentro del agua como elementos aislados, llegarían al fondo del

pozo en la cuarta parte del tiempo que necesitarían los granos menores de 1.58 mm.

Cuando el material granular se deja caer en grumos dentro de un espacio confinado. hay una menor tendencia de los granos a caer como elementos individuales. En estas condiciones. existe mayor seguridad de que los grumos de material puedan alcanzar el fondo del pozo sin una mayor separación de tamaños

El objetivo anterior se logra colocando la grava mediante el uso de un tubo de conducción o un embudo. Para ello. se hace bajar una sarta de tubos de 5 cm. o mayores. por dentro del espacio anular que se va a rellenar con grava. En el punto en que se va a alimentar de grava se coloca una tolva. Conjuntamente con la grava. se abastece suficiente agua para contribuir a evitar el que la grava deje vacíos dentro del tubo. El sistema de embudo es práctico para colocar el filtro de grava en aquellos pozos que van desde someros a moderadamente profundos.

La grava puede ser bombeada a través de

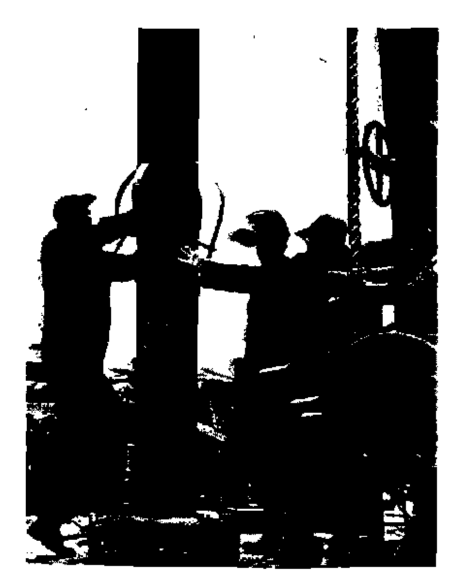


Fig. 237: Guías centradoras fijadas a la extensión de tubo colocada por encima de la rejilla.



Fig. 238: Colocación del material del filtro de grava a través de un tubo que se usa como embudo. dentro del espacio anular comprendido entre los ademes interior y exterior.

la tubería conductora. en lugar de introducirse por gravedad mediante corriente de agua.

El embudo se va levantando conforme el nivel del material del filtro va envolviendo a la rejilla. La misma sarta de tubos sirve para palpar el nivel superior del material y para medir la profundidad que éste ha alcanzado. conforme progresa el trabajo.

Cuando simplemente se arroja la grava al espacio anular desde la superficie. tiene lugar la separación de tamaños de las partículas finas y gruesas. conforme el material se va sedimentando en el agua o en el lodo. Cualquier obstrucción que se presente. a cualquier profundidad. puede causar que el material se salte dentro del agujero dejando un vacío en ese lugar.

Estas dificultades se pueden vencer invirtiendo la circulación del fluído dentro del pozo. conforme se va depositando la grava en el espacio anular. Para aplicar este procedimiento. se debe agregar agua para mantener lleno el agujero, conforme el fluído es bombeado desde el interior del ademe. El agua arrastra la grava hasta el fondo,

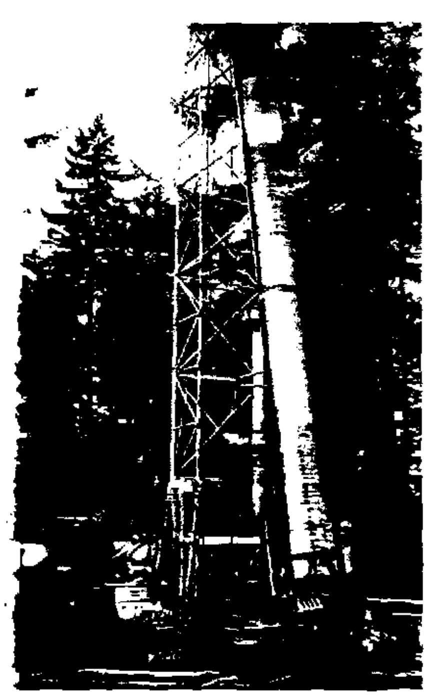


Fig. 239: Instalación de una rejilla Johnson en un pozo con filtro de grava perforado por el método rotatorio de circulación inversa, cerca de Tacoma, Washington.
(Cortesía de L. R. Gaudio Well Drilling Co.)

mientras fluye hacia abajo por el exterior del ademe. En tanto que la grava va llenando el espacio alrededor de la rejilla, el agua pasa a través de las aberturas de ésta y fluye hacia arriba hasta alcanzar la succión de la bomba, en el extremo superior del pozo.

El principio fundamental en que se basa este procedimiento se aplica también para bombear material de filtro de grava y colocarlo en los pozos profundos. El método de bombeo exige una organización cuidadosa, una cuadrilla de experiencia, y un equipo en el que se pueda confiar. Una de las ventajas de esta técnica particular es la de que en esta forma puede colocarse la cantidad correcta de grava para llenar el espacio anular hasta la profundidad que se desea, sin sobrepasar el nivel en que se halla la herramienta de colocación.

La Fig. 241 muestra la disposición de rejilla y equipo en un pozo de 810 m. de profundidad, dentro del cual se bombearon más de 3 toneladas de arena gruesa uniforme alrededor de una rejilla Johnson de 15 cm. de diámetro y 58 m. de longitud.

Conforme la arena y el agua se bombean dentro del espacio anular que rodea a la rejilla, el agua que retorna pasa a través de las aberturas de ésta y de ahí a la superficie a través de la tubería que se utiliza para suspender el conjunto dentro del pozo. Durante la operación, debe observarse cuidadosamente el manómetro, manteniendo constante el flujo de arena y agua. Tan pronto como el nivel del material ha rellenado hasta el extremo superior de la rejilla principal, la presión aumentará un poco. A esto sigue un repentino aumento de presión cuando el material llega a rellenar hasta la altura de la corta rejilla indicadora.

En este momento, el operador debe interrumpir la alimentación de grava. Conociendo la razón de alimentación de grava y el volumen de agua contenido en el espacio anular, desde la superficie hasta el extremo superior de la rejilla indicadora, el operador sabe exactamente cuántos kilogramos de grava están aún cayendo con el agua en ese instante. Mediante estos datos, se puede calcular la elevación que ha alcanzado el nivel superior del filtro de grava o si el material ha sido arrastrado hasta el espacio que se halla alrededor de la tubería de extensión por encima de la rejilla indicadora.

Existe un método más elaborado, para depositar un filtro de grava dentro de un pozo profundo de diámetro relativamente pequeño, que ha estado en uso por cierto número de años en la industria petrolera. Al igual que el método que se acaba de describir, el material granular se bombea con agua o con lodo delgado, pero haciendo uso de una instalación especial mediante un dispositivo particular, que bien podría denominarse crucero.



Fig. 240: La grava que se introduce por la tubería de alimentación fluye hacia el espacio anular a través de grandes aberturas. La placa soldada interiormente por debajo de estas mantiene a la grava por fuera de la rejilla.
(Cortesía de Keys Well Drilling)

El crucero se conecta entre la tubería de perforación y el extremo superior de la rejilla. Esta se suspende del crucero mientras el conjunto se hace descender dentro del pozo con tubería de perforación. La Fig. 242 muestra en forma esquemática los elementos esenciales de la herramienta y las trayectorias del flujo del fluído cuando se está colocando el material.

El crucero deriva su nombre de la disposición especial de pasajes y entradas, que hacen que el fluído bombeado hacia abajo, a través de la tubería de perforación, descargue por debajo del empaque especial de hule, al mismo tiempo que el flujo de retorno es conducido hacia arriba y a través del mismo empaque hasta alcanzar el espacio anular que rodea a la tubería de perforación.

La presión de la bomba obliga al fluído a desplazarse a través de las aberturas de la rejilla y a pasar al tubo conectado al extremo inferior de la herramienta especial. El tubo de alimentación de grava se extiende unos pocos centímetros por debajo del extremo inferior de la rejilla, de manera que el flujo se ve obligado a depositar inicialmente la grava en el fondo del agujero.

En todos los pozos acondicionados con un filtro artificial de grava, es necesario disponer de una cierta cantidad de ésta como reserva, por encima de la rejilla del pozo, ya que se produce cierto asentamiento del material durante el desarrollo y limpieza final de la formación. Teniendo en cuenta esto, se hace necesario instalar una extensión

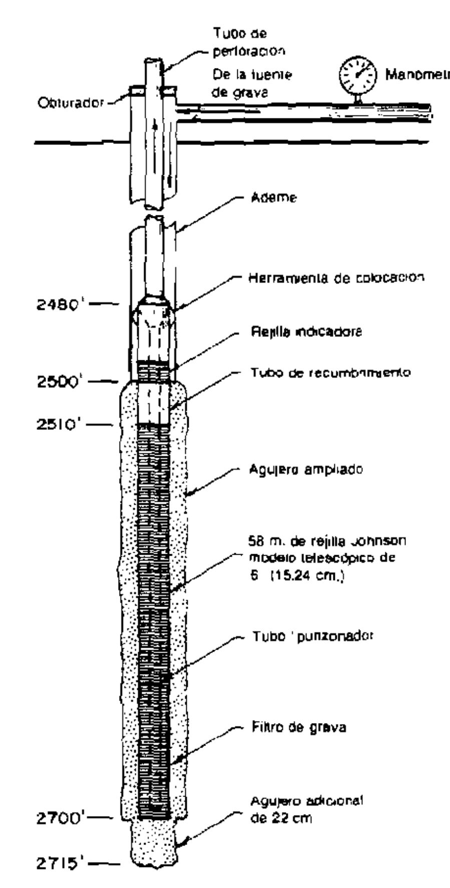


Fig. 241: El esquema muestra los elementos esenciales de la colocación de un filtro de grava utilizado en la terminación de un pozo profundo en Algeria. *(Cortesía de Compagnie Hydraulique)*

de tubo por encima de la rejilla. Este tubo puede extenderse hasta la superficie o puede terminar por debajo del nivel del terreno dentro de una tubería de mayor diámetro que al mismo tiempo sirve como ademe para el intervalo de pozo que se halla por encima de ese nivel.

En el caso mostrado en la Fig. 242, la tubería de extensión por encima de la rejilla, es de 30 m. de longitud. La rejilla Johnson tiene 88 m. de largo. Esta va a ser instalada y

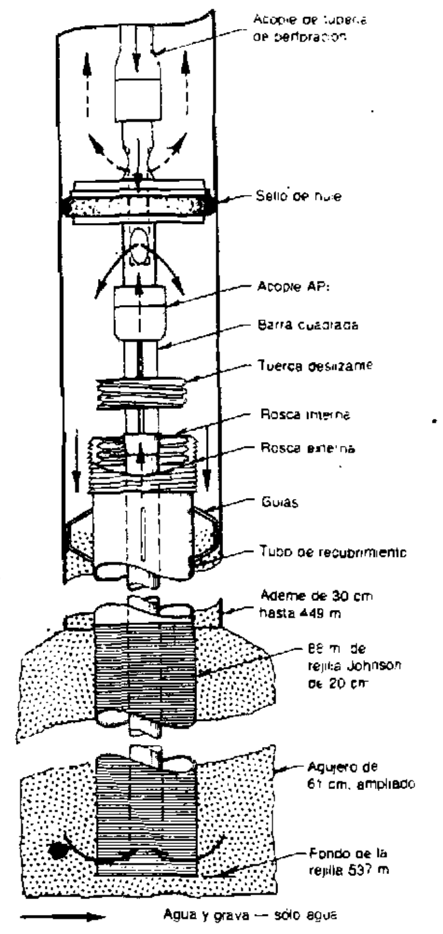


Fig. 242: Elementos esenciales del crucero que se utilizó para emplazar la rejilla y colocar el filtro de grava en un pozo profundo en Dakota del Sur.

acondicionada con filtro de grava en un intervalo de pozo no rimado o ampliado, desde una profundidad de alrededor de 450 m. hasta los 538 m.

La formación acuífera, en este caso, es una arenisca friable o desmenuzable. La arenisca se halla débilmente cementada, por lo que no permite el que se bombee desde un agujero abierto sin el peligro de que el material se derrumbe. Por lo tanto, era imperativo el uso de una rejilla de pozo y de un filtro artificial de arena gradada, para asegurar la producción de una agua libre de arena.

El material del filtro de grava consistía de una arena gruesa filtrante cuyo tamaño efectivo era de alrededor de 1.02 mm. y de un coeficiente de uniformidad de 2.0. La permeabilidad de este material es de más de 50 veces la de la arenisca.

El conjunto de la rejilla de pozo se hizo descender con tubería de perforar, acondicionada con el crucero y el tubo de alimentación fijado tal como se muestra en la figura que se muestra a continuación.

Antes de introducir cualquier cantidad del material del filtro de grava, se hace circular agua para eliminar todo el lodo de perforación que hubiese podido quedar en el agujero. Tan pronto como el flujo de retorno, aflorando en la superficie, indicaba que la mayor parte del lodo de perforación había sido eliminado del agujero, la arena filtrante especial se introdujo junto con el agua que se hizo circular.

La fricción del fluido y la presión en el sistema de circulación aumentan progresivamente conforme el material granular se va depositando alrededor de la rejilla. En el momento en que el material alcanza a llegar hasta el extremo superior de la rejilla, se observa un aumento repentino de la presión. Es necesario observar esto con cuidado, para lograr una interpretación correcta de las indicaciones dadas por el manómetro, y para estimar en forma adecuada el volumen de material depositado

y el que se halla en tránsito aún, en cada etapa de la operación.

Aunque la descripción que se ha dado pareciera indicar que el procedimiento es bastante sencillo, en realidad se necesita un equipo complicado y costoso así como una destreza considerable. Cada etapa de la operación debe coordinarse correctamente, para asegurarse un flujo continuo e ininterrumpido del material granular, a una velocidad tal que no llegue a taponar la tubería de perforación, o que el material se descontinúe dentro del agujero al extremo de que la presión pudiera aumentar tanto como para producir un reventón.

Sellado del Espacio Anular

En la mayor parte de los pozos que tienen filtro artificial de grava, se requiere, por lo general, algún tipo de sello por encima de la grava, para cerrar el espacio anular entre el extremo superior de la tubería de extensión y el interior del ademe instalado en el intervalo superior del pozo. Este sello evita el movimiento ascendente de la grava cuando el pozo se está bombeando.

Para mantener la grava en su lugar, se pueden colocar sobre ésta, bolsas que contengan mezcla para cementación. Para lograr este propósito, también se pueden utilizar balines de plomo o pastillas de algodón de plomo.

A menudo, se instala también un sello mecánico, conocido como un empaque deslizante de plomo. Este dispositivo consiste esencialmente de un anillo de plomo algo parecido a la zapata para hincar tubería. La parte inferior de este sello es de un diámetro apropiado para que descanse en la tubería de extensión. La parte superior se construye de un diámetro y espesor de pared tales que permitan expander el sello dentro del ademe del pozo. El empaque es expandido mediante un bloque de recalcar o apisonar, que corrientemente se usa para este propósito.

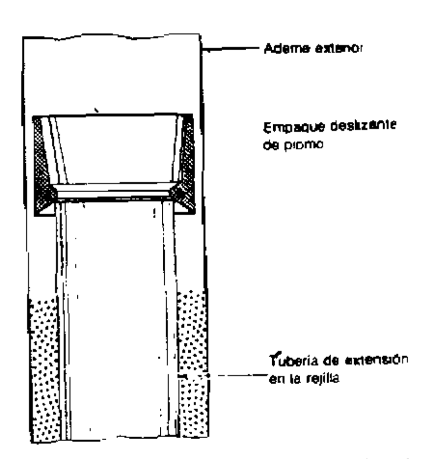


Fig. 243: Empaque deslizante de plomo colocado en su lugar sobre la tubería de extensión. Cuando es expandido, el empaque cierra el espacio anular en torno a la parte superior de la grava.

Extracción de Rejillas

A veces se presentan ciertas situaciones en las que se hace necesario extraer una rejilla del pozo. La extracción de una rejilla sin levantar al mismo tiempo el ademe del pozo, es, desde luego, posible solamente en aquellos casos en los que la instalación original ha sido realizada por el método de colocar la rejilla en forma telescópica por dentro del ademe.

La necesidad de extraer una rejilla de pozo puede deberse a varias razones, entre las cuales tenemos:

1. Incrustación y cementación de la arena de la formación en torno a la rejilla por la acción de cierta materia que no puede eliminarse mediante algún tratamiento químico aplicado en sitio.

2. Corrosión que haya dañado la rejilla y que cause que el pozo comience a arrojar arena.

3. Abandono del pozo, por lo que se desea utilizar la rejilla en uno nuevo.

Las rejillas de 10 cm. de diámetro y mayores, se extraen mejor utilizando para ello una tubería de diámetro menor, aprisionada por dentro de la rejilla mediante

un tapón de arena. La arena, colocada cuidadosamente en el espacio en torno a la tubería para halar y la pared interior de la rejilla, forma una abrazadera que sirve como conexión estructural entre ambas. El tapón de arena constituye la mejor y más confiable manera de transmitir la fuerza aplicada para halar la rejilla

Aunque la aplicación del tapón de arena se remonta a varios años atrás, la comprensión de por qué el sistema trabaja con tanto éxito se presentó cuando los experimentos de mecánica de suelos llegaron a demostrar que una masa de arena limpia, si se halla confinada, puede resistir grandes esfuerzos bajo ciertas condiciones

Por lo general cualquier rejilla que haya permanecido en su lugar por un cierto periodo de tiempo, es casi seguro que se encuentra firmemente adherida a la formación. Para remover la rejilla con seguridad, la fuerza al halarla deberá distribuirse sobre una porción considerable de su longitud. Esto es cierto, no obstante el tipo de enrejillado que se encuentre dentro del pozo. El atrapar la rejilla, ya sea por su parte superior o por el fondo, mediante un arpón, no constituye una práctica recomendable.

La Fig. 244 muestra los elementos del tapón de arena e indica cómo se halla éste formado. El primer paso consiste en obtener el tamaño apropiado de tubería para halar. La Tabla XXIX indica los tamaños comúnmente usados para halar diversos tamaños de rejillas de pozo. Resulta prudente emplear, para el trabajo, tubería de la mejor calidad. Todas las roscas y las uniones deben hallarse en buenas condiciones, de modo que puedan transmitir la fuerza completa. En los tamaños pequeños, se recomienda utilizar tubería extra resistente.

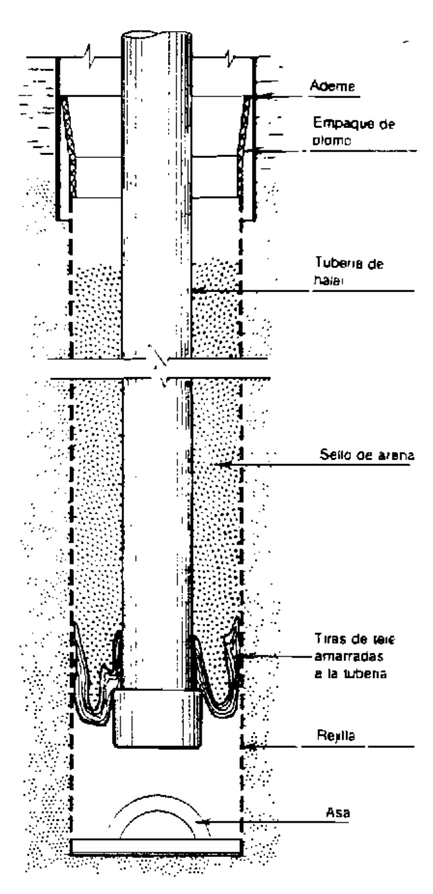


Fig. 244: Elementos del método de abrazadera o tapón de arena que se recomienda para la extraccion de rejillas.

Envoltura de la Tubería de Extracción

El próximo paso del procedimiento consiste en colocar tiras de alguna tela resistente, tal como el yute, asegurándolas firmemente a la tubería de halar. Estas se amarran a la tubería justamente por encima de una unión o acople conectado al extremo inferior, o por encima de un anillo soldado. El material de la envoltura se corta en tiras de 5 a 10 cm. de ancho, usándose 5 cm. cuando se va a halar rejillas de diámetros menores y más anchas cuando las rejillas son de mayor diámetro. La envoltura sirve para formar una bolsa que retiene el relleno de arena, conforme ésta se va colocando en torno a la tubería de extracción. Las tiras del material se ajustan perfectamente a la

Tabla XXIX
Tamaños de la Tubería de Halar

Dimensiones en Pulgadas			
Diámetro Nominal de la Rejilla	Diámetro Interior de la Rejilla	Tubería de Halar Diámetro Interior	Cantidad de Arena Lts. por m. Lineal
4	3	1½	2.86
5	4	2	5.21
6	4⅞	3	6.46
8	6⅝	4	12.41
10	8⅝	5	23.59
10	8⅝	6	17.38
12	10⅜	6	33.52
16	13¼	8	49.66
16	13⅛	10	28.55
18	15	10	55.87
20	17	12	64.56
24	21	12	141.53

superficie interior de la rejilla cuando la tubería de extracción se hace bajar por dentro de ésta.

Para evitar que la masa de arena se descontinúe en cualquier punto del ademe del pozo, se considera una buena práctica el mover el extremo superior de la tubería de halar hacia uno y otro lado, mientras se va agregando la arena. Algunos perforadores utilizan también un pequeño chorro de agua para arrastrar la arena hacia abajo cuando se la está colocando.

Una vez que la cantidad apropiada de arena ha sido vaciada dentro de la rejilla, se levanta gradualmente la tubería de extracción para compactar la masa de arena y desarrollar una firme adherencia, por medio de fricción, en la superficie interior de la rejilla. Se puede aplicar alguna tensión adicional a la tubería por medio de gatas que actúen contra abrazaderas fijadas a la tubería o contra un anillo dotado de muelas.

Resistencia de la Arena al Cizallamiento

Los ensayos para determinar la resistencia de las arenas, realizados por los ingenieros especializados en el campo de la mecánica de suelos, han establecido cómo el tapón de arena transmite la fuerza aplicada desde la tubería a la rejilla. La arena desarrolla una alta resistencia al cizallamiento o cortante, cuando se halla en una condición densa o compacta, y cuando se encuentra confinada de manera que no pueda expanderse al aplicar la fuerza. El tapón de arena satisface plenamente estas condiciones.

El tirón inicial de la tubería compacta gradualmente la arena alrededor de ésta. Luego, al aplicar una fuerza mayor, la arena densa se encuentra imposibilitada para expanderse, puesto está confinada por la tubería y por la pared interior de la rejilla.

Los extremos superiores de las tiras de envoltura se han ceñido alrededor de la tubería de extracción y amarradas provisionalmente como se puede observar en la Fig. 245. Luego se hace bajar la tubería dentro del pozo hasta que únicamente los extremos superiores de las tiras sobresalgan del borde superior del ademe. Se corta entonces la amarra que las sostiene, y se distribuyen uniformemente alrededor de la boca del ademe. Se hace descender inmediatamente la tubería de extracción hasta que se halle muy cerca del fondo de la rejilla, teniendo cuidado de que se mantenga lo más centrada posible en el pozo.

Cuando se extraen rejillas de 40 cm. de



Fig. 245: Las tiras de material de tela se amarran con alambre al extremo inferior de la tubería extractora.

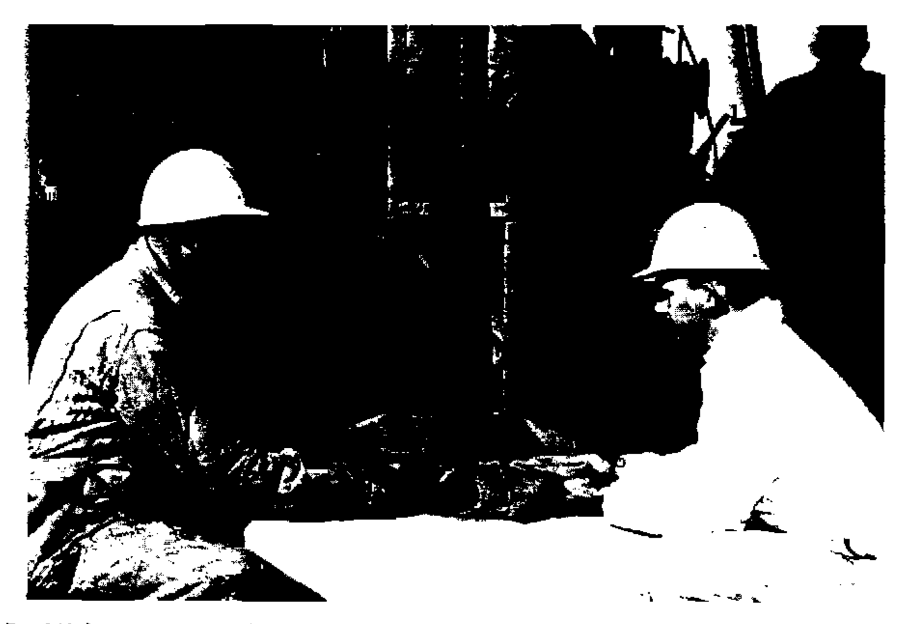


Fig. 246: Los extremos superiores de las tiras de tela, se distribuyen uniformemente alrededor de la boca del ademe, conforme la tubería de halar se va haciendo descender en éste.

diámetro o aún mayores, algunos perforadores prefieren usar un disco en el extremo inferior de la tubería de halar, antes que la bolsa de tela, y formar así el tapón de arena. Se provee una placa soldada por dentro del extremo inferior de la tubería, perforándole cuatro huecos para su posterior fiajción. Luego, se fija con pernos a esta placa, un disco de acero de un diámetro casi igual al diámetro interior de la rejilla, proveyendo de este modo una brida removible en el fondo de la tubería de extracción.

Cuando se recupera la rejilla, el fondo cerrado para pescarla se desenrosca del extremo inferior. Posteriormente, se retiran los cuatro pernos que sostienen el disco al fondo de la tubería de extracción como a su vez el disco. Todo lo anterior facilita la desconexión de la tubería de halar de la rejilla.

Otros perforadores sueldan a veces anillos en dos o tres diferentes niveles a lo largo de la tubería de extracción, para que se desarrolle una mayor fricción en el tapón de arena. Con el mismo propósito, podrían utilizarse unos cortos niples de tubo, unidos con acoples de tubería. Se sabe que este sistema ha resultado muy práctico para extraer rejillas de 15 cm. de diámetro y menores.

Colocación del Tapón de Arena

Una vez que la tubería de extracción se ha hecho descender hasta una profundidad próxima al fondo de la rejilla, se vacia arena dentro del espacio anular comprendido entre ambos. La arena debe vaciarse lenta y uniformemente alrededor de toda la periferia. La cantidad de arena debe ser la suficiente como para llenar la rejilla en un intervalo de unos dos tercios de su longitud. Debe tenerse mucho cuidado de calcular bien la cantidad exacta de arena y de no colocar tanta que llegue a derramar por sobre el extremo superior de la rejilla. Se puede



Fig. 247: Una vez que la tubería de extracción se ha hecho descender hasta el fondo del pozo, se vacia la cantidad exacta de arena en forma lenta y uniforme para llenar la rejilla hasta el nivel que se desea.

insertar dentro del pozo una sarta de tubos de pequeño diámetro, para verificar el nivel de la arena y asegurarse de que la rejilla no haya sido sobre llenada.

Los ensayos demuestran que el valor del ángulo de fricción interna de la arena saturada es prácticamente el mismo que el de la arena seca. En un principio, se pensó que el agua actuaba como un lubricante y reducía el ángulo de fricción interna. Se sabe ahora que ello es falso. Esta es una circunstancia afortunada, ya que significa que se puede contar con un valor alto del ángulo de fricción interna, en un tapón de arena que deberá actuar bajo sumergencia completa, cuando se utiliza en una rejilla de pozo.

La Tensión Debe Aplicarse Lentamente

Cuando todo está listo para empezar a levantar la rejilla, debe mejor aplicarse la tensión a la tubería de extracción, en varias etapas. Con esto se reduce el peligro de reventar la tubería en alguna unión. Deberá aplicarse una fuerza razonable mediante las gatas y mantener esta fuerza constante por un corto tiempo, para darle a la carga que se está aplicando a la tubería la oportunidad de ejercer una tensión continua sobre la rejilla. Algunas veces resulta útil dar tirones a la tubería, en tanto se mantiene la fuerza de extracción.

A continuación, la fuerza puede irse aumentando gradualmente, hasta que la rejilla empiece a moverse. La extracción deberá continuarse tan rápido como lo permita el equipo.

Utilización de las Gatas

Una vez que la rejilla empieza a moverse, puede prescindirse de las gatas y el resto del trabajo de extracción realizarse con el equipo de izar de la máquina de perforación. En ocasiones, el interior de la tubería de ademe ha sido severamente corroído y se ha llenado de incrustaciones de herrumbre o tubérculos. Esta condición reduce sustancialmente la luz que debe quedar por dentro del ademe y obliga a continuar con las gatas, aún cuando la rejilla se haya ya levantado por dentro del ademe.

Después de que la rejilla ha sido izada hasta la superficie, el tapón de arena deberá aflojarse con un chorro de agua. Si se dispone de éste, puede usarse un compresor de aire conjuntamente con el chorro de agua para aflojar la arena y así poder zafar la tubería de extracción del interior de la rejilla.

El tipo de arena que debe usarse para formar el tapón varía de acuerdo con el tamaño de la rejilla y el espesor del espacio comprendido entre la tubería y la misma. La cualidad más importante que debe exhibir es la de ser un material limpio y áspero. La arena que contenga aún pequeñas cantidades de limo y arcilla, no se compactará adecuadamente cuando sea colocada en torno a la tubería y durante el proceso de asentamiento del tapón, al comienzo de la extracción. Los granos ásperos permiten obtener una mejor fricción interna que los lisos y redondeados.

Hablando en términos generales, la arena de tamaño mediano deberá usarse para extraer las rejillas de un tamaño menor. Para rejillas más grandes, puede emplearse un material más grueso. Cuando se extraen los tamaños mayores y si la tubería de extracción es de un diámetro apreciablemente menor que el de la rejilla, se puede utilizar un material tan grueso como la grava que se usa en recubrimiento de tejados. No es necesariamente importante disponer de un material uniforme, pero sí deben eliminarse aquellas partículas desproporcionadamente grandes.

Varios contratistas de perforación de pozos han desarrollado innovaciones en el uso del tapón de arena, las cuales han demostrado ser prácticas bajo determinadas circunstancias. Por ejemplo, pueden cortarse dos o tres ranuras en la tubería de extracción por encima del lugar en donde se amarra la bolsa de tiras de tela, de modo que el tapón

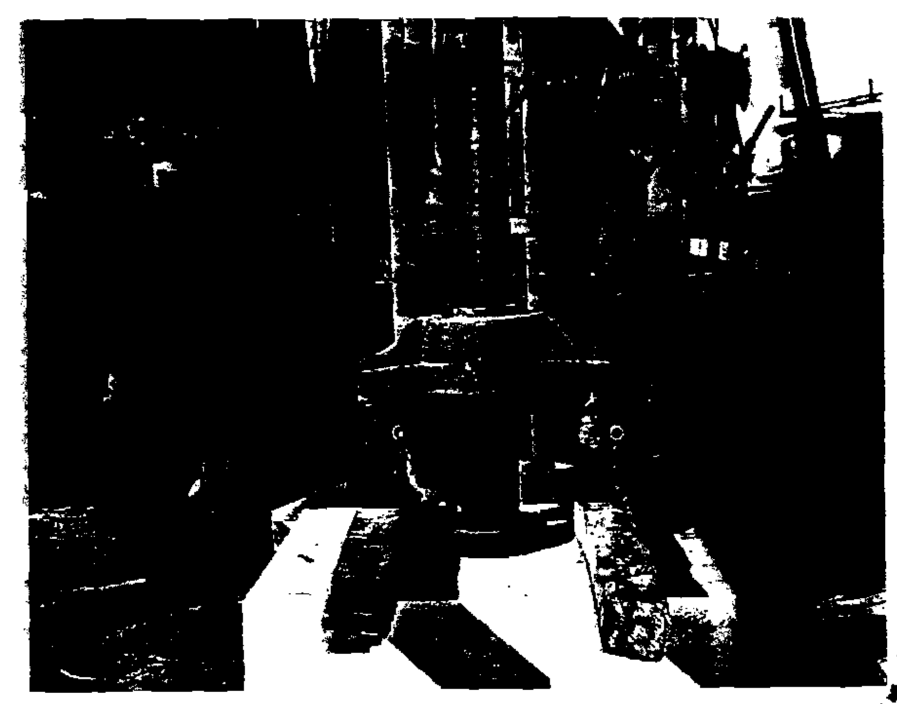


Fig. 248: Las gatas hidráulicas actuando contra un anillo de ademar con cuñas, aplican la fuerza necesaria a la tubería de extracción, que se halla aprisionada con arena dentro de la rejilla.

de arena puede aflojarse mediante contralavado y empleo de la cuchara de achicar desde el interior de la tubería de extracción, en el caso en que se desee separar la conexión por debajo del nivel del terreno. Las ranuras pueden también practicarse a un nivel que corresponda al de la parte superior de la rejilla, de modo que cualquier exceso de arena que se coloque, por error al calcular la cantidad, será arrastrado hacia la tubería, evitando así el sobre llenado de la rejilla.

Pre-Tratamiento de la Rejilla con Acido

El tratamiento del pozo con un ácido de baja concentración contribuirá, por lo general, a facilitar la extracción de la rejilla. Al disolver cualquier incrustación, el ácido reduce la fuerza necesaria para romper la adherencia inicial que aprisiona a la rejilla en la formación. Casi siempre se desarrollan herrumbre y otras incrustaciones de hierro alrededor del extremo superior de la rejilla y por dentro del extremo inferior del ademe del pozo. El tratamiento con ácido afloja estas materias evitando así cualquier deformación del extremo superior de la rejilla.

Con este propósito, se utiliza ácido muriático o clorhídrico. Una mezcla de ácido con agua, mitad y mitad, deberá introducirse por la rejilla, mediante una sarta de tubos de hierro negro, o de material plástico. Debe agregarse una cantidad suficiente como para llenar la rejilla y dejarla reposar por varias horas. Mediante la cuchara, deberá entonces achicarse el pozo, para eliminar el ácido gastado y cualquier otro material que se haya depositado dentro de la rejilla.

Si se siguen los sencillos pasos que se han

descrito aquí. se encontrará que el tapón de arena constituye la manera más fácil de atrapar una rejilla de pozo y de aplicar la fuerza necesaria para extraerla. Este procedimiento hace uso de los principios modernos y científicos de la mecánica de suelos. Más de un contratista de perforación de pozos ha encontrado que el tapón de arena es el método más útil para halar ademe de pozo, rejillas y otros elementos tubulares.

Capitulo 13

Sistemas de Pozos de Puntera

SE ENTIENDE COMO sistemas de pozos de puntera. los grupos de pozos poco separados entre sí, conectados por lo general a un tubo recolector y que se bombean mediante aspiración a presión atmosférica. Se utilizan para ello, pozos de pequeño diámetro. Estos no son mayores de 20 cm., pero por lo común consisten de punteras de 5 cm. de diámetro, con tubos de extensión de 3.8 cm. de diámetro, o mayores. La tubería de extensión constituye el ademe del pozo y la puntera la rejilla de éste.

Los sistemas de punteras se utilizan extensamente para desecar provisionalmente los sitios en que se están levantando construcciones, o para regular permanentemente, por razones especiales, el nivel de la superficie freática de una cierta área. También puede servir para abastecimiento de agua de diversos propósitos, tales como servicio municipal, industrial y riego.

Cuando las condiciones son favorables, los sistemas de punteras pueden suministrar grandes cantidades de agua en forma económica. Su operación satisfactoria depende por lo general de tres condiciones, a saber: el nivel freático debe hallarse a unos pocos metros desde la superficie del terreno, para que se puede bombear el agua utilizando l presión atmosférica; deberá existir un estrato de buenas condiciones acuíferas, a una profundidad que oscile entre 6 y 15 m.; los pozos deberán ser altamente eficientes.

Al suministrar agua para algún uso de interés. la disposición del sistema de pozos múltiples puede adaptarse a cualquiera de los modelos que se muestran en la Fig. 249. Cuando los pozos se ubican en la circunferencia de un círculo. se obtiene la mayor eficiencia hidráulica.

Cuando el grupo consiste de muchos pozos, la disposición menos eficiente es la de colocarlos a lo largo de una línea recta pero tiene la ventaja de ocupar el menor espacio.

La bomba central aspira agua de cada uno de los pozos de un sistema, produciendo un vacío parcial en las tuberías recolectora y de extensión. El vacío parcial o aspiración que la bomba mantiene, es el que determina el nivel hasta el cual podría extraerse agua del material del acuífero. Por lo tanto, deberá

escogerse una bomba que ostente buenas características de aspiración.

La mayor altura de aspiración que se puede obtener en la práctica, es de unos 7.5 m, y para la mayoría de las bombas el límite se halla entre 6 y 6.5 m. Algunas bombas centrífugas no bombean agua desde más allá de unos 4.5 a 5.0 m.

El máximo abatimiento que se puede imponer a los pozos está dado por la diferencia entre la altura de aspiración y el nivel estático del agua, ambas cantidades medidas desde el ojo del impulsor. De lo anterior se deduce que el bombeo que utiliza la altura de aspiración crea ciertas limitaciones al diseño del sistema, e impone ciertas condiciones para el logro de una operación satisfactoria. Todas las conexiones de tubería en el lado de aspiración de la bomba, deberán ser absolutamente herméticas al aire. Aún la más pequeña entrada de aire hará que la bomba funcione defectuosamente.

El área dentro de la cual el agua se abate por debajo del nivel estático al bombear un pozo, se denomina área de influencia. Hemos visto en el Cap. 6 que la extensión y la forma del área de influencia varían conforme lo hacen el caudal de bombeo, la permeabilidad y espesor del acuífero, el coeficiente de almacenamiento, la manera en que el agua subterránea extraída del acuífero es repuesta por la recarga, la presencia de barreras que limiten la extensión del acuífero y el tiempo durante el cual se bombee.

Es importante en un sistema de abastecimiento separar los pozos individuales, de modo que sus áreas de influencia se traslapen solamente muy poco. Por el contrario, las áreas de influencia de un sistema de punteras que se vaya a utilizar para desecar una área deben de traslaparse lo suficiente para hacer descender la superficie freática sobre toda el área que se desea. Debido al costo que implicaría realizar las pruebas necesarias para establecer ciertos factores, resulta poco práctico calcular con precisión la extensión y la forma de las áreas de influencia de un sistema de punteras. Por lo general, se usan ciertas normas basadas en el criterio y la experiencia, para establecer la separación entre los pozos.

De la discusión anterior, podemos ver que el diseño e instalación de un sistema múltiple de pozos debe lograr objetivos diferentes a

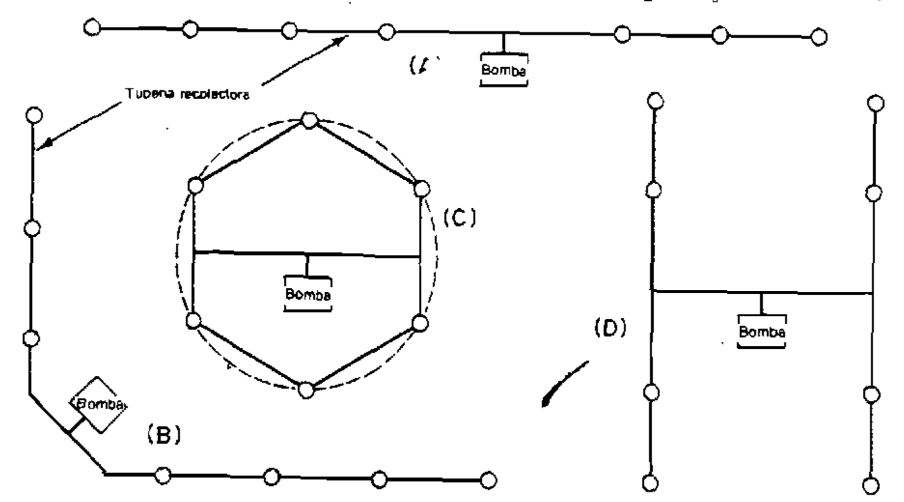


Fig. 249: Cualquiera de los diversos modelos puede utilizarse para disponer un sistema de punteras. Cuando la bomba se coloca en el centro, se obtiene mayor uniformidad en la aspiración.

los que se buscan con un sistema de desecación. La solución no consiste en simplemente copiar las características de un sistema provisional de desecación. Las características que serían de desear en éste último bien podrían no ser ventajosas en un sistema de abastecimiento de agua.

Punteras Resistentes a la Corrosión

El desarrollo de las punteras fabricadas enteramente de metales resistentes a la corrosión, tales como el Everdur y el acero inoxidable, ha ampliado el campo de su aplicación a los sistemas permanentes. Estos materiales soportan el ataque de las aguas corrosivas y además pueden ser tratados con ácido, en sitio, cuando han sufrido incrustación.

Durante muchos años, las punteras se han construído cubriendo un tubo perforado de acero con una envoltura de malla de latón y lámina perforada del mismo material. En algunos casos, se introduce un tubo ranurado de latón por sobre el tubo perforado que sirve de base. Estas envolturas proporcionan las aberturas del tamaño que se requiere, para impedir que la arena de la formación penetre el pozo.

Desafortunadamente, las punteras hechas a base de un tubo perforado recubierto con alguna envoltura de latón son susceptibles al efecto dañino de la corrosión. Muchas de las dificultades que se presentan provienen de la presencia de dos metales. Cuando el latón y el acero se ponen en contacto y son sumergidos en agua u otro fluído que sea conductor de la electricidad, una pequeña corriente eléctrica empieza a circular entre los dos metales. Esto es lo que se denomina una corriente galvánica, la que da por resultado una acción electrolítica que causa la corrosión.

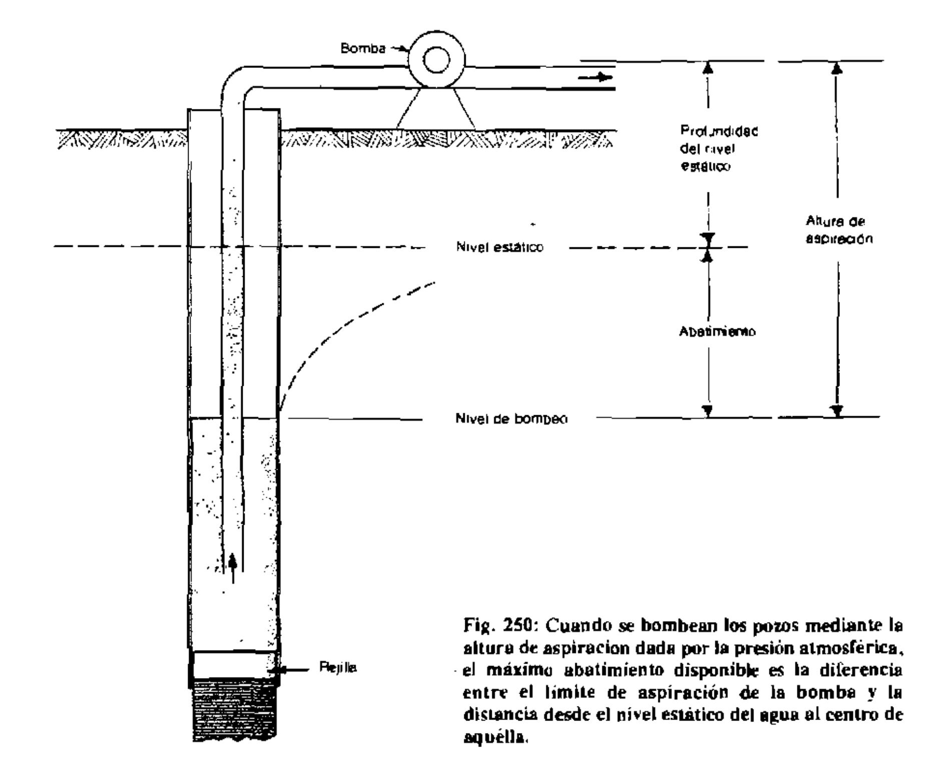


Fig. 250: Cuando se bombean los pozos mediante la altura de aspiración dada por la presión atmosférica, el máximo abatimiento disponible es la diferencia entre el límite de aspiración de la bomba y la distancia desde el nivel estático del agua al centro de aquélla.

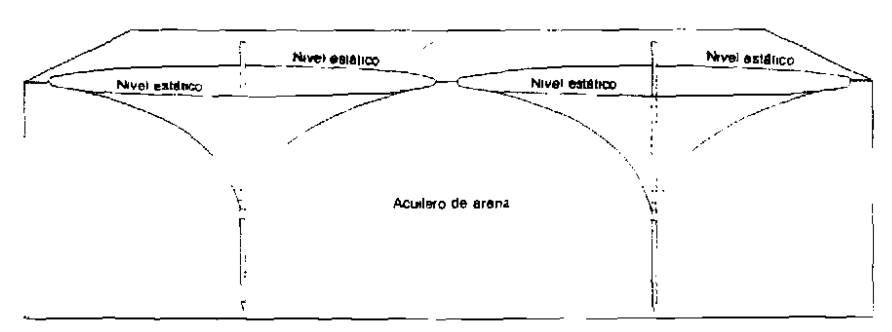


Fig. 251: Los pozos individuales de un sistema de abastecimiento deberán separarse lo suficiente para reducir la interferencia, esto es, que sus áreas de influencia se traslapen lo menos posible.

La invención de la rejilla soldada en 1930, fabricada a base de perfiles de alambre estirado en frío, abrió el campo para que se desarrollaran las punteras que se fabrican enteramente de metales resistentes a la corrosión. Primero se desarrollaron las punteras de Everdur y luego siguieron las de acero inoxidable.

El acero inoxidable es una aleación muy resistente, especialmente aquellos tipos que contienen por lo menos un 18 por ciento de cromo y un 8 por ciento de níquel. Se adapta maravillosamente a la soldadura para formar uniones de mucha resistencia. Con los perfiles de alambre, adecuadamente proporcionados, que se emplean en su manufactura, las punteras de acero inoxidable de que hoy en día se dispone están en capacidad de soportar un hincado severo y hasta abuso en su manipuleo. El producto actual hecho de acero inoxidable, tipo 304, producirá mayor sensación que la puntera de Everdur.

La aplicación de la rejilla soldada a las punteras no sólo permite construir éstas de un solo material, y de alta calidad, sino que les brinda la eficiencia con que cuentan las rejillas de mayor tamaño. La experiencia ha demostrado que la rejilla de pozo de ranura continua, con aberturas en forma de V que se ensanchan hacia el interior, es la mejor. La gran área de captación de estas rejillas da por resultado una menor velocidad de entrada por las ranuras, y un mínimo de pérdida de carga por fricción. La forma en V de las aberturas de la rejilla evita la obstrucción, que de otro modo causaría una resistencia adicional al flujo.

Separación de los Pozos

Las separaciones que oscilen entre 7.5 a 15 m., funcionan admirablemente en los sistemas de abastecimiento. Cuando se trata de formaciones constituídas por arena fina, de acuíferos delgados, o cuando el máximo abatimiento no debe sobrepasar de 1.50 m., pueden usarse separaciones menores. Los espaciamientos mayores de 15 m. pueden también utilizarse, cuando el espesor y la profundidad del acuífero permiten que se instalen rejillas de 3 m. de longitud o más largas.

Tanto la puntera como la rejilla deben colocarse suficientemente profundas dentro de la formación, de modo que su extremo superior se halle por debajo del límite de aspiración de la bomba. Si el nivel del agua en el acuífero se abate hasta por debajo del extremo superior de la rejilla podría penetrar aire al sistema a través de las aberturas superiores, e interrumpirse la aspiración.

La rejilla puede situarse hasta el nivel que se ha indicado únicamente si el acuífero se extiende hasta una profundidad suficiente. Bien podría ser que el acuífero, en ciertos casos, no sea lo suficientemente profundo o que no tenga gran espesor como para

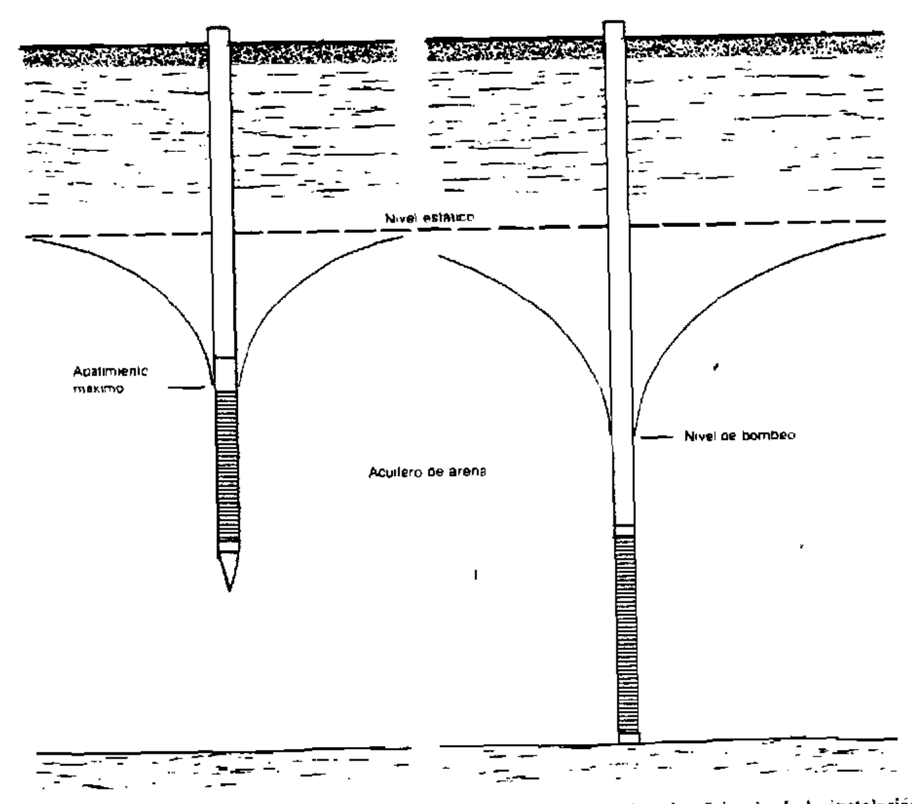


Fig. 252: La colocación apropiada de la rejilla dentro del acuífero mejora la eficiencia de la instalación. Cuando la rejilla se sitúa muy por encima, la bomba puede aspirar aire a traves de las aberturas superiores de la rejilla.

permitir la colocación de la rejilla por debajo de la máxima altura de aspiración de la bomba. En tales casos, deberá reducirse el caudal de bombeo, para que el nivel dinámico permanezca por encima del extremo superior de la rejilla. Desde luego que ello reducirá considerablemente tanto el rendimiento del pozo como el del sistema.

En los Capítulos 6 y 10, se ha visto que la longitud de la rejilla tiene mucho que ver con la eficiencia de cualquier pozo.

Por lo tanto, una longitud adecuada de rejilla es de suma importancia cuando se diseña un sistema de pozos múltiples para abastecimiento de agua. No es económico escatimar en la longitud de la rejilla, puesto que el aumento de eficiencia que se obtiene compensa ampliamente el costo adicional de una rejilla más larga y el ligero aumento en los gastos de la instalación. La rejillas largas mejoran a su máximo el comportamiento de éstas en formaciones de arena fina.

La estratificación de la formación acuífera influye en la longitud y en la colocación de una rejilla. Los resultados mejores se obtienen si la rejilla se instala frente a aquella parte de la formación que cede agua con más facilidad.

Instalación de Punteras

Las punteras individuales pueden llevarse hasta la profundidad necesaria, hincándolas, o se pueden hacer descender por diversos métodos que utilizan un chorro de agua. A



Fig. 253: Sistema de punteras instalado en una playa de Florida, el cual suministra agua salada y limpia, filtrada en forma natural por la arena de la playa y que se utiliza en una piscina vecina.

menudo se instalan también pozos perforados de 10 cm. de diámetro o mayores, para establecer un abastecimiento de agua. Los métodos para hincar punteras y para perforar pozos de mayor diámetro, se han discutido en detalle en el Capítulo 11.

Cuando la puntera se ha llevado a la profundidad que se desea, se deberá desarrollar y limpiar el pozo. Este es un paso de la mayor importancia en su completación. El desarrollo de la formación en torno a la rejilla hace que el pozo alcance su máximo rendimiento. Este efecto se obtiene agitando el agua para que se desplace hacia dentro y hacia afuera de las aberturas de la rejilla, removiendo así el limo y las partículas más finas de la formación. La agitación del agua por dentro del pozo se puede lograr



Fig. 254: Una sola puntera Johnson, de 5 cm. de diámetro y 1.80 m. de longitud, que suministra agua a una serie de aspersores para riego cerca de Sand Springs, Oklahoma. La prueba arrojó un rendimiento máximo de 9 litros por segundo.

haciendo subir y bajar un émbolo suelto en el agua, por dentro de la tubería de extensión de la rejilla. O también puede utilizarse una bomba usada, conectándola a la tubería de extensión y haciéndola funcionar intermitentemente para producir así la agitación del agua. Si se vacía agua dentro del pozo para lavarlo ocasionalmente, ello contribuye a desarrollar y a estabilizar la formación en torno a la rejilla. Cuando se observa que el pozo se encuentra totalmente desarrollado, debe bombearse éste y eliminar el agua sucia hasta que descargue agua libre de arena.

Tan pronto como el agua se ha aclarado, es muy importante verificar la presencia de arena dentro de la puntera. Deberá eliminarse cualquier cantidad de arena que se hubiese sedimentado en el fondo de la rejilla. Para lograr esto, se hace bajar dentro del pozo una sarta de tubos de 2.5 cm. de diámetro, conectándole una bomba manual en su extremo superior. Enseguida, a mismo tiempo que se inyecta agua al pozo alrededor de la tubería, se hace funcionar la bomba manual. Conforme la arena va siendo expulsada, se hace descender la sarta de tubos de 2.5 cm. hasta que alcance el fondo de la puntera. Debe continuarse bombeando hasta que el agua aclare de nuevo.

Métodos de Chorro de Agua

La *puntera Johnson*, acondicionada con un fondo de cierre automático y que se ilustra en la *Fig. 258*, ha sido diseñada para colocarla mediante el procedimiento de



Fig. 255: Instalación de una puntera Johnson de Everdur en arena de playa de la Costa Oriental de Africa. La tubería de inyección es manejada por un hombre, mientras otros dos colocan la puntera y el tubo de extensión en el agujero perforado a chorro. El sistema ya terminado erogó un caudal de 80 lts. por segundo de agua salada para surtir a una piscina.



Fig. 256: **Bomba manual empleada para extraer la arena fina y desarrollar pozos de 5 cm. de diámetro de un pequeño sistema de punteras en Gulfport. Ill.**

lavado, ya sea en arena o en otra formación de material suelto. Para ello, se utiliza una tubería provisional que lanza el chorro de agua a presión a través del fondo de cierre automático. Cuando se utilizan punteras de 1¼ pulgadas de diámetro, la tubería de inyección que se emplea es del tipo estandar de ½ pulgada de diámetro, y de 1 pulgada de diámetro cuando se usan punteras de 2 pulgadas de diámetro.

La bomba necesaria para instalar punteras por el método de lavado a chorro, ha de tener una capacidad de alrededor de 6.5 lts. por segundo, a una presión de aproximadamente 3.5 Kg/cm². En condiciones favorables, se podría utilizar una bomba menor, pero es recomendable que ésta disponga de una capacidad amplia.

En los pozos someros, de hasta unos 6 a 12 metros de profundidad, la puntera y la tubería de extensión se instalan como si fueran una sola unidad. Primeramente se acopla a la puntera un tramo de tubería de extensión de unos 3 a 6 m. de longitud. Luego se coloca la tubería auxiliar de inyección por dentro de la tubería de extensión y de la puntera, de forma que el extremo inferior de la línea de inyección descanse sobre la válvula de cierre automático. La salida de descarga de la bomba se conecta enseguida a la tubería de inyección por medio de un tramo de manguera de presión. Esta manguera deberá ser de un diámetro de por lo menos 2.5 cm. Además, debe instalarse una válvula en un punto próximo a la descarga de la bomba. Todas las conexiones deberán permanecer herméticas.

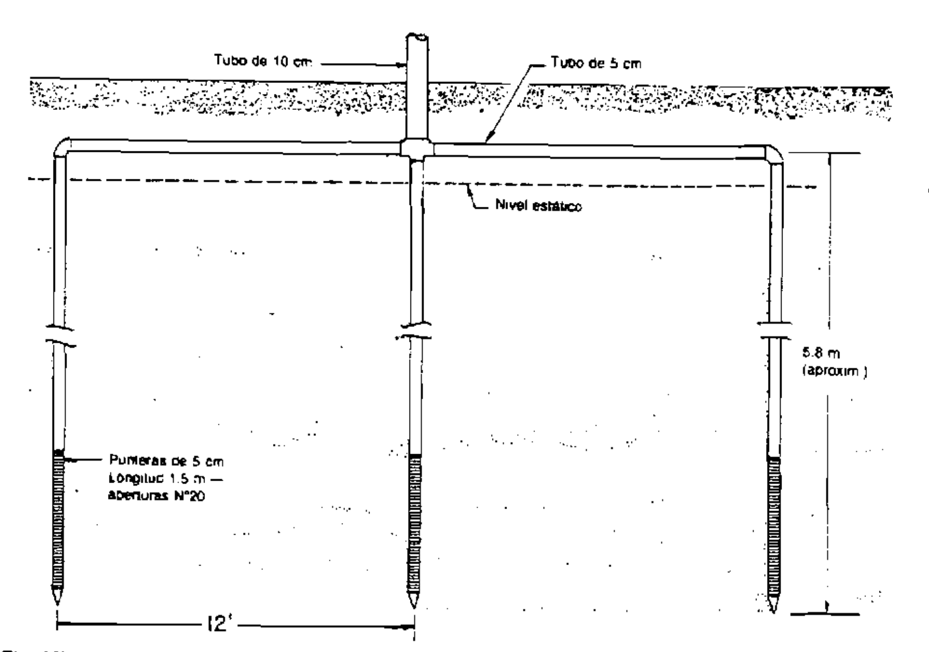


Fig. 257: **Detalles de uno de los varios pequeños sistemas instalados en Gulfport, Ill., con el propósito de suministrar agua en caso de incendio. Cada sistema puede suministrar 20 l/seg.**

Para dar comienzo a la operación por chorro, ha de excavarse un hoyo de unos 30 cm. de profundidad; luego, se coloca el conjunto de puntera y tubería de extensión en forma vertical dentro del agujero y se abre parcialmente la válvula de la descarga de la bomba. Conforme el terreno se va lavando, por debajo de la puntera, ésta irá descendiendo lentamente. Mediante movimientos hacia arriba y hacia abajo de la sarta, se logra acelerar la penetración. Mientras se continúa inyectando el chorro de agua, deberá abrirse la válvula para aumentar el caudal.

Si la operación de lavado debe interrumpirse para dar lugar a la colocación de un tramo adicional de tubería de extensión que permita llevar la puntera a una profundidad mayor, el agujero alrededor de la tubería de extensión deberá mantenerse lleno de agua hasta que la operación se reinicie. Manteniéndolo en esta forma, se evita que el agujero se derrumbe mientras se conectan tramos adicionales de tubos de extensión y de inyección.

Si se desea envolver la puntera con arena, dentro del agujero, deberá disminuirse el caudal de agua para reducir la velocidad del flujo de retorno. Luego, se vacia arena gruesa en el agujero, en derredor del tubo de extensión. Esta arena caerá hasta el fondo del agujero perforado por el chorro distribuyéndose alrededor de la tubería de extensión mientras el lento flujo de retorno mantiene abierto el agujero.

La puntera de auto-inyección o lavado, que se describe mas adelante en este mismo capítulo, no debe usarse en un sistema de abastecimiento de agua por dos razones, a saber: debido a la presencia del tubo central de extracción, el tipo de auto-inyección no se puede desarrollar tan efectivamente como el que se acaba de describir; además, el tubo de extracción produce también un aumento de la pérdida de carga dentro de la puntera cuando se bombea el pozo ya terminado.

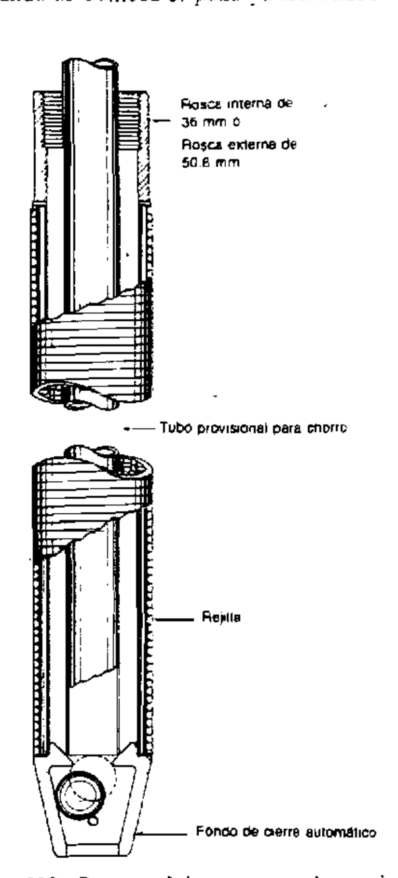
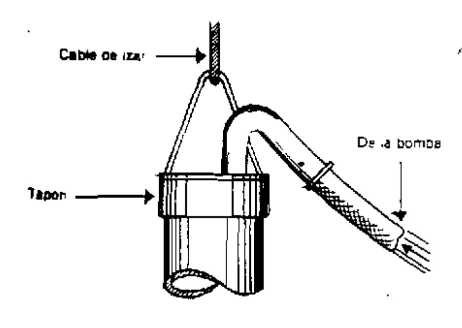


Fig. 258: **Puntera Johnson para desecacion, acondicionada con fondo de cierre automático del tipo de esfera flotante. La tuberia provisional de inyección se utiliza para llevar la puntera y la tubería de extension hasta la profundidad que se desea.**



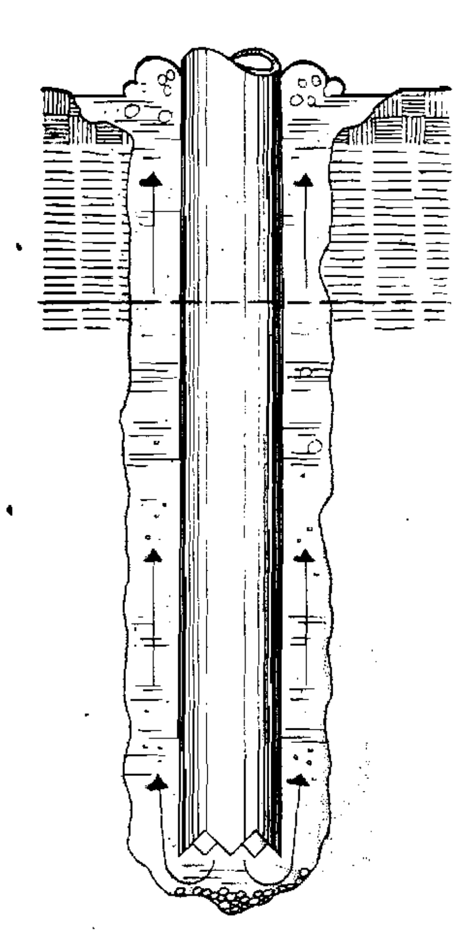


Fig. 259: Una puntera con tubería de extensión puede instalarse dentro del agujero abierto por chorro de agua, utilizando una tubería separada de inyección.

En la Fig. 259 se ilustra otro método de chorro que se emplea para instalar punteras. Se acondiciona una sarta de tubos con un tapón hermético en su extremo superior y una serie de groseros dientes en la periferia del extremo inferior. La bomba impulsa el chorro de agua a través de una conexión apropiada colocada en el tapón superior. En esta forma, se va abriendo el agujero por dentro del terreno, conforme el chorro emerge por el extremo inferior de la tubería. Si aparecieran capas compactas de limo y arcilla, se hace subir y bajar la sarta para obligar a los dientes a que corten el material más duro.

Cuando se ha abierto el agujero hasta la profundidad deseada, se pueden introducir la puntera y la tubería de extensión, aparejadas a la tubería de inyección. O también, retirarse el tapón e introducir la puntera y la tubería de extensión por el tubo de inyección. Esta es luego retirada del agujero.

Existe un tercer procedimiento que utiliza la tubería de inyección como ademe permanente del pozo. En este caso, la puntera, acondicionada con un empaque adecuado en su extremo superior, se hace descender hasta el fondo por dentro de la tubería. Luego se levanta ésta en la distancia justa para dejar expuesta la rejilla en la formación acuífera.

Las operaciones de limpieza y de desarrollo, en los pozos instalados por procedimiento de chorro, se realizan siguiendo los métodos que se han descrito para otra clase de pozos. Por lo general, estos pozos pueden desarrollarse muy rápidamente, ya que la operación misma de lavado a chorro elimina una parte del limo y de la arena fina.

Tubería y Conexiones

Un factor importante al escoger el diámetro de la tubería de extensión o de ademe y el del tubo de aspiración es que este diámetro sea suficientemente grande.

Las pérdidas por fricción del sistema se reducen a un mínimo al utilizar tubería del mayor tamaño posible dentro de límites prácticos. Con ello, se aprovecha una mayor parte de la carga disponible de aspiración de la bomba, para abatir los pozos. El resultado neto es el de un aumento, en proporción casi directa, de la producción del sistema. Si por ejemplo, el abatimiento de los pozos puede aumentarse de 2.70 m. a 3.00 m., el rendimiento se incrementa en un 10 por ciento.

Deberá usarse una válvula en cada ramal de tubería que conecta los pozos al colector principal. Como ninguno de los pozos del sistema tendrá un comportamiento idéntico, a menudo se hace necesario regular la descarga y el abatimiento de uno o más pozos, para balancear adecuadamente el sistema total. Esta válvula permite también aislar cada pozo, para poderlo reparar o limpiarlo, sin necesidad de tener que interrumpir el funcionamiento de todo el sistema.

La disposición de tubos múltiples o del colector principal de un sistema de abastecimiento de agua puede consistir de tubería estándar de acero galvanizado o de bierro fundido. Corrientemente, los tubos han de enterrarse por debajo del nivel de congelación.

La tubería liviana que se utiliza como colector, en trabajos provisionales de desecación, no resulta apropiada para instalaciones permanentes.

Sistemas de Desecación

El resto de la discusión referente a sistemas de pozos del tipo de punteras, se referirá principalmente a su utilización en trabajos provisionales para desecación o drenaje de aquellos sitios en que se construye en terrenos húmedos. Las zanjas para alcantarillado y tubería de agua y las excavaciones para fundaciones tienen que llevarse a veces a profundidades que se hallan por debajo del nivel freático normal. Para trabajar en lo seco, se hace necesario

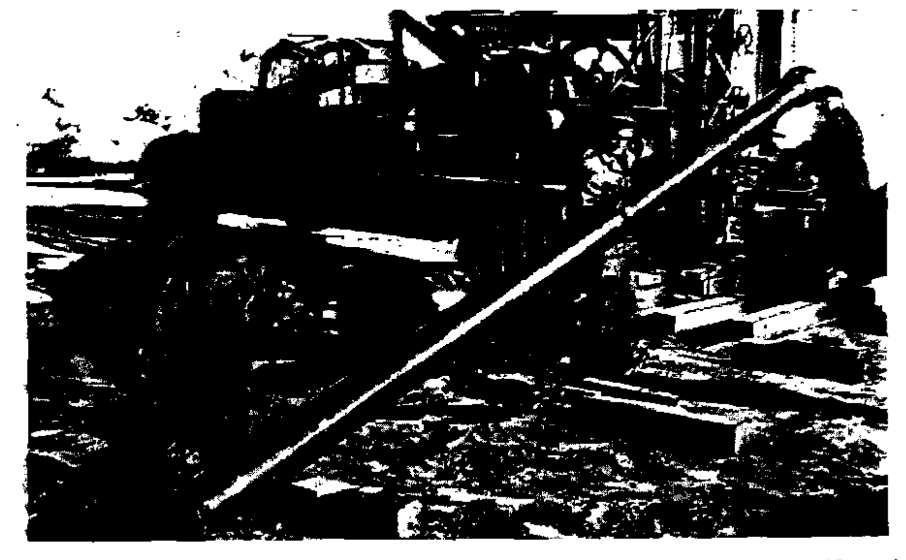


Fig. 260: Rejilla Johnson en el momento de ser instalada como parte de una serie de pozos de 20 cm. de diámetro, todos conectados a una tubería colectora que conduce el agua hasta una estación de bombeo para abastecer de agua a un sistema municipal en Wisconsin.

abatir el nivel de la superficie freática mediante el bombeo de un sistema de punteras instalado en un lugar adyacente al sitio de las excavaciones. En la mayoría de los casos, resulta más económico extraer el agua mediante punteras, que rodear la excavación con un tablaestacado y bombear el agua desde el interior del área de trabajo. Una desecación adecuada elimina también el peligro de la formación de erupciones de arena que se crean en el fondo de la excavación.

No fue sino hasta 1930, que los contratistas americanos vinieron a apreciar plenamente la economía que representa el uso de punteras para trabajos de desecación, aunque esta práctica había sido altamente desarrollada en Europa desde varios años antes. Uno que otro trabajo aislado fue desecado en los Estados Unidos mediante instalaciones rudimentarias hace unos 40 ó 50 años, pero sin aplicar ninguna ingeniería al diseño del sistema, para ajustarlo a las condiciones geológicas e hidrogeológicas. Hasta hace unos 25 años, los contratistas y los ingenieros creían que un sistema de desecación mediante punteras, sólo funcionaría correctamente en el caso de que el suelo saturado consistiera de arena limpia y que se encontrara libre de intercalaciones de limo o de arcilla, de baja permeabilidad. El mejoramiento de los diseños de punteras, bombas y otros componentes, sumado a la aplicación de los principios de la hidráulica de aguas subterráneas, y al conocimiento empírico obtenido de la experiencia, permite hoy en día, obtener pleno éxito en aquellos trabajos de desecación que otrora se consideraban imposibles de ejecutar.

El hacer descender el nivel de la superficie freática en una área determinada de construcción, implica tener que crear un cono compuesto de depresión, bombeando desde el sistema de punteras. Los conos individuales de depresión, alrededor de cada pozo, deben de traslaparse para crear un cono de abatimiento compuesto. Para

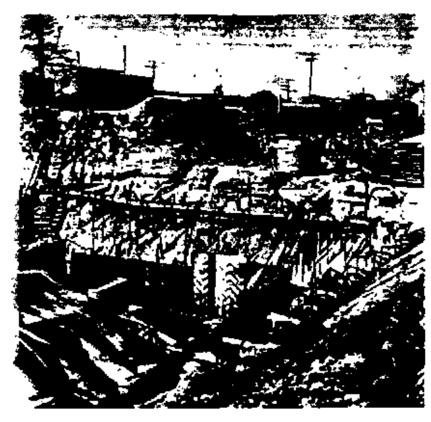


Fig. 261: Los sistemas de desecacion mediante punteras, hacen descender la superficie freática y permiten excavar en lo seco, para instalar edificaciones.

obtener esto, se deben emplazar los pozos lo suficientemente juntos como para que se interfieran entre sí y se logre abatir varios metros la superficie freática en los puntos intermedios situados entre cada par de pozos. Este criterio contrasta en forma directa con la forma en que tan ampliamente se separan los pozos en los sistemas de abastecimiento de agua.

En un sistema de desecación, las punteras se separan por lo general entre 0.60 y 1.50 m. entre sí, dependiendo de la permeabilidad de la formación saturada, del nivel hasta el cual se desea hacer descender la superficie freática, y de la profundidad a que se puedan instalar las punteras dentro del espesor saturado.

La Fig. 262 muestra cómo la superposición de las áreas individuales de influencia de dos pozos pequeños da por resultado un abatimiento compuesto del nivel de saturación. Mientras se mantenga el bombeo, el nivel del agua permanecerá a las elevaciones indicadas. En esta forma, el material permeable que se encuentra por encima de la superficie freática abatida, drena el agua por efecto de la fuerza de gravedad y el terreno puede ser excavado, como material seco, en cualquier lugar

dentro del cono compuesto de abatimiento, definido en la figura por los niveles de agua indicados.

Es bueno apuntar que la formación del cono completo de abatimiento y la desecación a que éste da lugar, de la formación contenida dentro de su área de influencia, no tienen lugar de inmediato al comenzar a bombear. Se necesitan varias horas de bombeo contínuo para desarrollar completamente el abatimiento del nivel de saturación en torno a cada pozo. Se requiere también que transcurra cierto tiempo adicional para que el agua que satura a la formación en la porcion desecada, percole verticalmente. Para tener en cuenta este factor de tiempo, en la práctica lo que se hace es dar comienzo al bombeo del sistema de punteras uno o más días antes de iniciar la excavación.

En los trabajos de gran magnitud, deben efectuarse pruebas detalladas de bombeo, para establecer la mejor separación de las punteras y determinar el tiempo que se requiere para desecar el suelo hasta la profundidad necesaria. Aplicando adecuadamente la teoría de no equilibrio al analizar las pruebas de bombeo, se obtendrán las respuestas a estas incógnitas.

El máximo abatimiento que se puede mantener dentro de la formación adyacente a cada pozo, es igual a la altura de aspiración que la bomba puede desarrollar, menos la distancia desde el centro de la bomba al nivel estático del agua y menos las pérdidas de carga que se produzcan en la tubería y dentro de las punteras mismas.

Gran ventaja se podría obtener si fuera posible excavar inicialmente hasta casi alcanzar el nivel estático del agua subterránea, y colocar luego las bombas a esta profundidad.

Por lo tanto, se observa que la altura de aspiración de la bomba, impone una limitación definida a la profundidad hasta la cual se podría desecar mediante el empleo de un solo grupo de punteras. Esta limitación puede, sin embargo, vencerse mediante el empleo de dos o más sistemas separados instalados en etapas sucesivas. Las Fig. 263 y 264 ilustran este principio.

El sistema de la primera etapa se instala como se sugiere en la Fig. 263. Al bombear este sistema, la superficie de saturación desciende lo suficiente como para permitir la excavación de varios metros por debajo del nivel freático original. A continuación se instala el segundo sistema a esta elevación

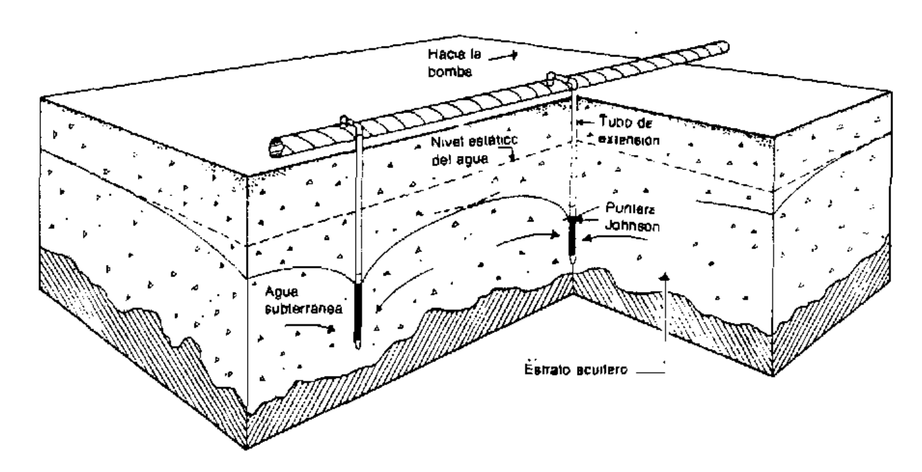


Fig. 262: La mutua interferencia entre dos o más pozos hace bajar la superficie de saturación durante las operaciones de desecación.

inferior, tal como se indica en la Fig. 264. Las punteras, la tubería colectora y las bombas de esta segunda etapa, se instalan tan por debajo como sea posible, de la primera etapa. Al bombear este sistema, el agua descenderá a un nivel suficiente como para completar la excavación hasta la profundidad requerida. Se puede agregar una tercera etapa si se necesitase obtener una desecación a mayor profundidad.

El bombeo continuo del sistema de la segunda etapa puede llegar a drenar el suelo circundante del primer grupo de punteras, dejándolo en alto y seco. En cuanto esto sucede, se interrumpe el funcionamiento de la primera etapa. Las bombas y otras partes de esta primera etapa pueden utilizarse luego en los sistemas de la segunda o tercera, pero posiblemente haya que instalarlas de nuevo en el primer sistema para que entren en funcionamiento cuando se retiren las etapas posteriores.

En condiciones favorables, el nivel del agua puede ser abatido en etapas de unos 4.5 m., mediante el procedimiento de desecación escalonada. Sin embargo, los descensos de 3 a 4 ms., por etapa, son más corrientes y corresponden a las condiciones promedio.

Cuando se encuentran dos estratos de material saturado separados por una capa impermeable de arcilla, podría necesitarse el empleo de dos sistemas separados de punteras. En tal caso, un grupo de punteras puede llevarse hasta el nivel superior de la arcilla, y dentro de la arena del estrato de más arriba, y el otro grupo, instalarse dentro de la arena del estrato inferior, hasta la profundidad requerida y por debajo del lecho impermeable de arcilla.

La presencia de capas compactas de arcilla y limo, a varias profundidades dentro del terreno saturado, hace más complicado el diseño del sistema de punteras, puesto que

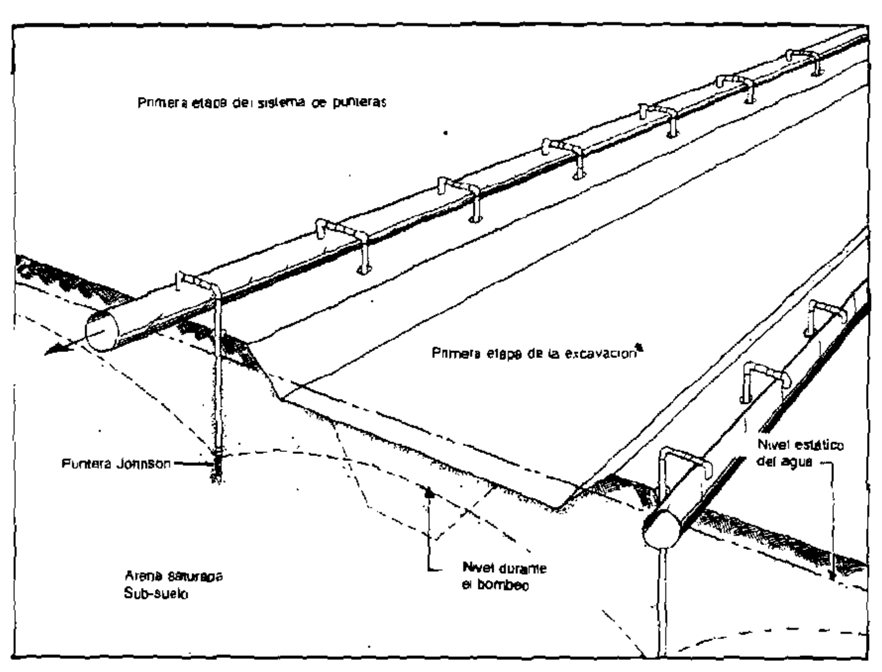


Fig. 263: Dependiendo de la profundidad hasta la cual se desee abatir la superficie freática, podrían necesitarse uno o más sistemas de punteras para lograr la desecación.

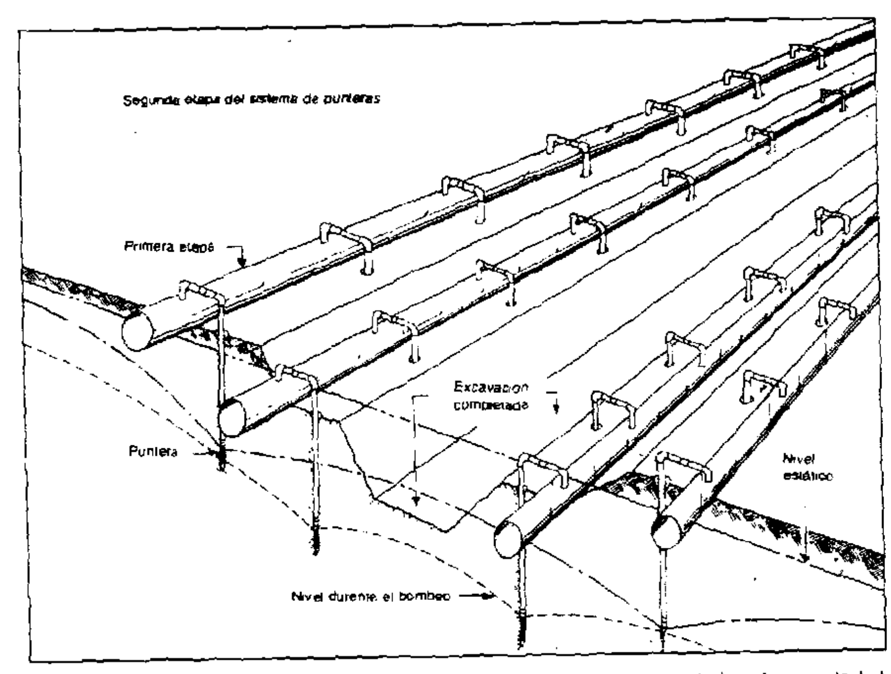


Fig. 264: La segunda etapa de un sistema de punteras se instala a un nivel inferior, después de haber excavado hasta la profundidad que permite el bombeo de la primera etapa. Al bombear la segunda etapa, el nivel del agua se abate aun más, para poder seguir excavando hasta la profundidad que se desea.

estas capas impiden el drenaje o percolación vertical de la arena sobreyaciente. Aunque estas capas podrían ser tan delgadas como de unos 2.5 cm. o algo así, son prácticamente impermeables. Para lograr éxito en la desecación de una formación estratificada, se requiere tomar provisiones para drenar cada estrato de material permeable, como si fuese una formación separada. Ya se indicó anteriormente que para lograr este propósito, posiblemente se necesite un sistema de tres etapas, estando las punteras de cada grupo instaladas en el fondo de cada capa individual de material permeable.

Cuando las condiciones no son muy complicadas, se pueden abrir canales verticales de drenaje por dentro del estrato impermeable, envolviendo con arena cada puntera y su tubería de extensión, colocadas ambas dentro de agujeros de 20 a 30 cm. de diámetro. Se introduce luego por el método de chorro, un ademe provisional que atraviesa todo el estrato, y centrando en este tubo la puntera, se llena todo el espacio anular con arena gruesa, hasta la elevación del nivel estático. Finalmente, se va retrayendo el ademe exterior, conforme el filtro de arena se coloca.

Este filtro o envoltura de arena proveerá el conducto de drenaje vertical que se desea, aunque a veces éste no funciona debido a la película de limo y arcilla, que se puede formar sobre la pared del agujero, por la acción alisadora del ademe provisional conforme éste se va retirando. Esta película no se puede eliminar por encima del extremo superior de la puntera, porque no hay manera de obtener un desarrollo o acción de lavado encima de la rejilla que puede remover cualquier material atrapado entre la formación natural y la cara exterior del filtro de arena.

Cuando la estratificación pudiera constituir un problema, resulta muy útil ejecutar algunas perforaciones de prueba y bombearlas experimentalmente para determinar las profundidades óptimas de colocación. Deberá verificarse la producción de la formación acuífera a diferentes elevaciones, instalando sucesivamente la bomba y bombeando la puntera de cada pozo de prueba, a diversas profundidades. Primero, puede colocarse la puntera a la máxima profundidad y luego se levanta ésta unos pocos metros, para realizar un segundo ensayo. Al efectuarse la prueba de bombeo, debe instalarse un manómetro de vacío a la entrada de la bomba para medir la altura de aspiración. El caudal de bombeo se verifica midiendo el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido

Profundidad de Colocación

La profundidad apropiada a la cual se deberán de instalar las punteras, se halla influída por tres factores, a saber: (1) la profundidad máxima de la excavación que se propone realizar; (2) si se va a encontrar o no un lecho de arcilla o de roca a esta profundidad y (3) la existencia y profundidad a la cual se hallan, dentro de la arena, algunas capas o lentes de material impermeable.

Suponiendo que el material acuífero se extiende varios metros por debajo del fondo de la excavación, las punteras deberán hundirse suficientemente para que sus extremos superiores queden situados a por los menos 90 cm. por debajo de la parte más profunda de la excavación. Si se va a utilizar únicamente una sola línea de punteras en un trabajo de zanjado, los extremos superiores de las punteras deberán hallarse a 1.20 m. por debajo del fondo de la zanja. Si las condiciones del trabajo lo permiten, sería preferible emplazar las punteras a una profundidad todavía mayor con respecto al fondo de la excavación. Las colocaciones a profundidad mayor garantizan que toda la longitud de cada rejilla estará siempre por debajo del nivel más profundo de bombeo.

Si la excavación se va a llevar hasta un basamento de arcilla o roca, atravesando completamente el estrato de arena saturada, deberán tomarse las medidas necesarias para colocar las punteras de manera que se logre una desecación completa de los últimos 30 ó 60 cm. de la arena. Si las punteras se hallan apenas por encima de la capa impermeable, sólo podrá abatirse el nivel del agua hasta la profundidad en que el aire podría entrar a la rejilla, rompiendo así la aspiración. Esto podría ocurrir en la parte superior de la rejilla o a unos 30 cm. arriba del fondo de la arena, si las punteras están provistas de una tubería central de descenso.

Horadando agujeros de mayor diámetro en el fondo impermeable hasta una profundidad de unos 60 a 90 cm., se pueden colocar las punteras envueltas en un filtro de arena a una mayor profundidad, lo que permite llevar el nivel de bombeo hasta el fondo. Para lograr esto, se hace descender mediante inyección de chorro de agua un ademe provisional de unos 15 ó 20 cm. de diámetro, hasta la profundidad requerida, colocando en forma concéntrica con éste, la sarta de punteras y tubos de extensión, y llenando con arena limpia y gruesa el espacio anular en torno a la puntera. Conforme se coloca la envoltura de arena, se va retrayendo el tubo provisional de ademe. Si el fondo se halla constituido por roca o lutita dura, materiales que no podrían ser penetrados mediante chorro de agua, puede que sea necesario utilizar una máquina de perforar, para hacer los hoyos en los que se van a colocar las punteras. Debe analizarse en cada caso si el perforar estos agujeros en un basamento de roca está justificado o no.

Drenaje de Suelos muy Finos

El filtro de arena resulta muy ventajoso cuando se van a drenar arenas muy finas cuyos granos sean de un tamaño escasamente mayor que el limo. La envoltura de arena

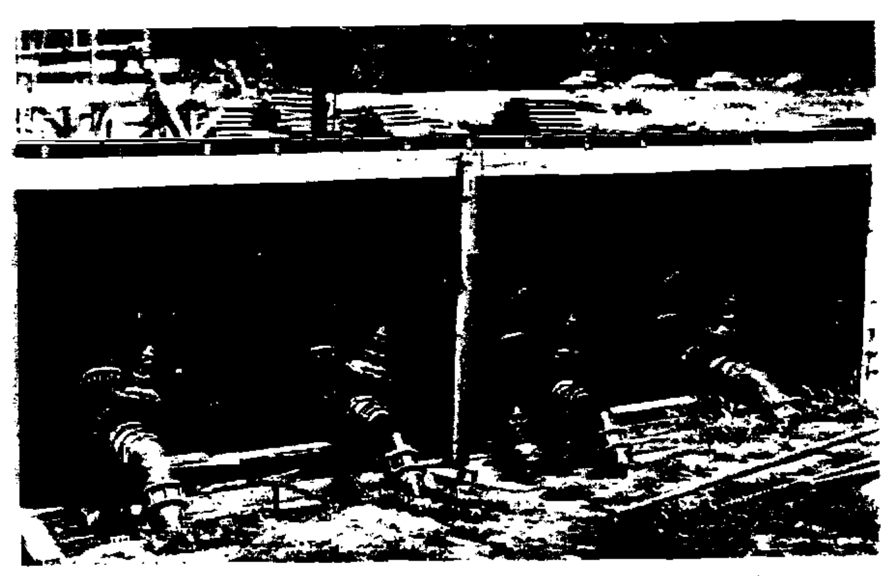


Fig. 265: Una batería de cuatro bombas para desecación, operando en un extenso sistema de punteras, para abatir el nivel del agua subterránea en un proyecto de construcción, en el norte de Indiana.

gruesa en derredor de cada rejilla, permite el drenaje, impidiendo al mismo tiempo que los materiales finos penetren junto con el agua, en los pozos.

Las gradaciones adecuadas del material que se utiliza para los filtros de arena de pozos perforados en diversas formaciones, han sido establecidas por los fabricantes de punteras. Los usuarios de las punteras tienen a su disposición los resultados de las investigaciones y experimentos realizados.

El rendimiento de tales suelos finos

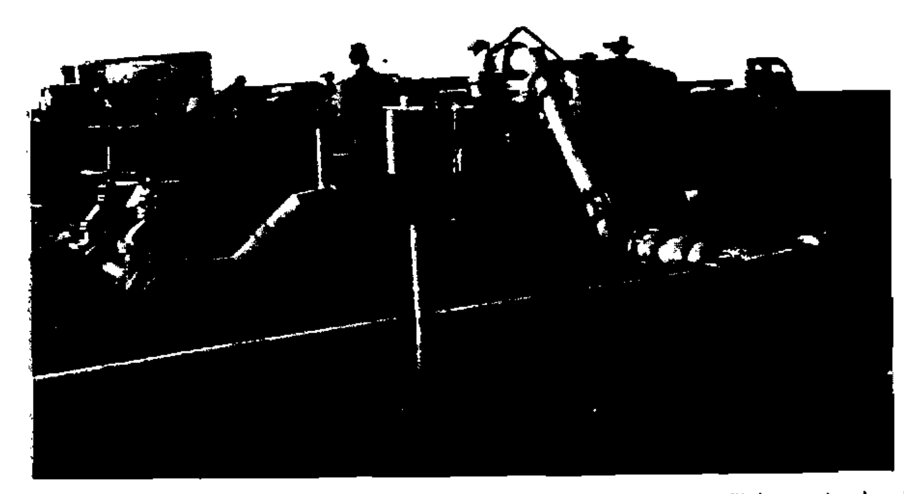


Fig. 266: El sistema de bombeo para desecación consiste de bombas centrífugas auxiliadas por bombas de vacío. La disposición de la tubería comprende las conexiones de la bomba al colector principal de 20 cm. de diámetro, y la tubería para descargar el agua extraída, fuera del área.



Fig. 267: Sarta para la colocacion de punteras por el método de autoinyeccion: la bomba para producir el chorro de agua entrega ésta por la manguera indicada a una presión entre 4.2 y 8.4 Kg/cm².

siempre es muy bajo, de hecho tan bajo, que cabe preguntarse si podría obtenerse una desecación de significado práctico. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que en muchos casos el material se estabiliza con la eliminación de aún un pequeño volumen de agua. Con el escape del agua por los taludes de la excavación, debido al efecto constante del bombeo del sistema de punteras, la tensión superficial que se produce en el agua contenida en los poros de la formación constituye un factor de gran significación en la estabilización de estos taludes, además de la reducción que tiene lugar, del contenido de agua del suelo.

Características de las Punteras

Ya se han destacado anteriormente las razones de la alta eficiencia de las punteras de ranura continua. Estas rejillas, hechas al igual que las de tamaño mayor que se utilizan en grandes pozos permanentes, se fabrican mediante el arrollado de un alambre de sección transversal especial alrededor de un esqueleto de barras longitudinales. Cada punto de contacto entre el alambre y las barras se fija sólidamente con soldadura. Esto da por resultado una rejilla de una sola pieza, resistente y tosca, pero con un gran porcentaje de área abierta. Esta puntera está en capacidad de soportar gran desgaste, algo muy importante de tener en cuenta, puesto que las punteras para trabajos de desecación se instalan y se retiran repetidas veces.

Para el trabajo de desecación se utilizan tanto el tipo de hincado como el de instalación a chorro.

Cuando las rejillas han de acondicionarse con filtros de arena por las razones antes dichas, resulta más económico emplear el tipo de hincado. Estas punteras se hallan disponibles, si se desea, con tubos centrales de inyección.

Las punteras del tipo de instalación a chorro de agua, dotadas de un fondo de cierre automático, se instalan junto con su tubería de extensión, usando una bomba que suministre de 280 a 380 lts. por minuto, a una presión no menor de 5.6 Kg/cm². La Fig. 258 muestra una puntera de ranura continua acondicionada con un fondo de



Fig. 268: Puntera colocada en toda la profundidad, lista para ser conectada al tubo colector. Se muestra la parte del colector en que se han instalado las uniones giratorias formadas con manguitos ahusados.

cierre automático. La Fig. 270 muestra la misma puntera, dotada de un tubo interno de inyección.

El tubo central mencionado sirve para dos propósitos, pero al mismo tiempo tiene ciertas desventajas. Este tubo permite hincar la puntera mediante la acción del chorro de agua sin necesidad de instalar uno provisional para inyectar el chorro por dentro de la tubería de extensión y de la puntera. En segundo lugar, la puntera, acondicionada con el tubo central de inyección, permite que el nivel del agua dentro de la formación pueda ser abatido hasta el nivel del fondo del tubo sin que se interrumpa la aspiración de la bomba. Esto obviamente es de desearse cuando las punteras deben situarse justamente por encima de un estrato impermeable.

Una desventaja del tubo central es que este causa una pérdida adicional de carga por fricción, en la puntera. El agua que entra a ésta debe de fluir hacia abajo por el exterior del tubo, doblar a 180° para entrar a éste y luego escapar hacia arriba a través de una sección de diámetro reducido. Otra de las dificultades consiste en que la presencia de este tubo interno impide el efectivo desarrollo de la formación en torno a la rejilla. Cuando no se utiliza este tubo, el desarrollo se va efectuando mientras las punteras se bombean y se limpian antes de ponerlas en funcionamiento. Este desarrollo juega un papel importante en la mejora de la eficiencia de operación de cada puntera del sistema.

El término "unión giratoria" lo emplean los contratistas de obras de desecación para



Fig. 269: Las uniones giratorias flexibles, se obtienen introduciendo los extremos de las mangueras de aspiración, en niples o manguitos ahusados fijados a su vez al tubo colector o de extensión.

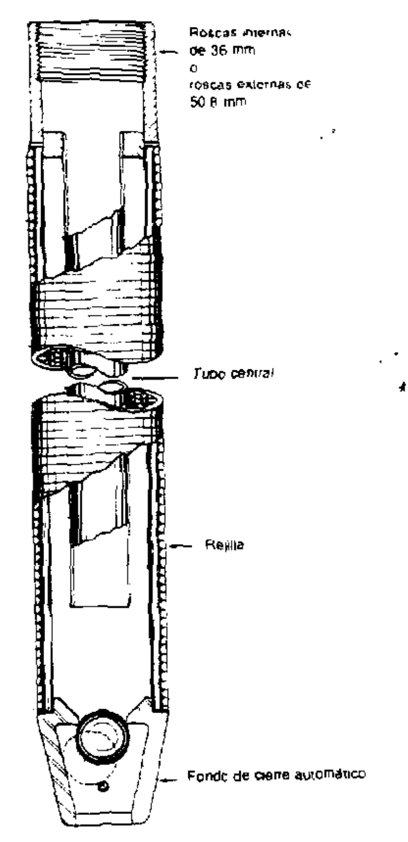


Fig. 270: Puntera Johnson para desecacion, acondicionada con tubo central integral para inyeccion, con el que obtiene una característica de autoinyección y que permite abatir el nivel del agua hasta un punto próximo al fondo, sin romper la aspiración de la bomba.

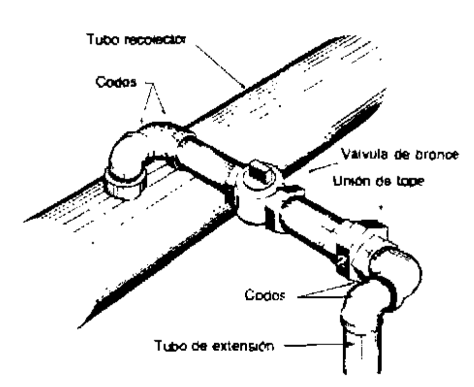


Fig. 271: Detalles de una unión o acople giratorio, constituido por accesorios de plomería, manguitos o niples y válvula de bronce.

referirse a los accesorios que conectan cada tubería de extensión del sistema de punteras al colector. Esta unión puede hacerse con accesorios de 38 mm (1½") o de 50 mm. (2"), tal como se muestra en la Fig. 271. Esta conexión puede hacerse girar horizontal y verticalmente para llevarla hasta el extremo superior de la tubería de extensión. Tal flexibilidad resulta muy importante puesto que siempre la puntera, como su tubería de extensión, se desvían unos pocos centímetros de la posición calculada.

Las Fig. 268 y 269 muestran un diseño mejorado de unión giratoria que evita el tener que hacer ninguna unión roscada cuando se instala un sistema de punteras. El accesorio que la mejora consiste de un manguito o niple liso y ahusado, enroscado a un codo que a su vez se fija al extremo superior del tubo de extensión, y de un tramo de manguera de hule, además de un segundo manguito ahusado, conectado a cada uno de los orificios perforados en el tubo colector. Entre el manguito que sale del tubo colector y el niple ahusado opuesto de la unión giratoria, se instala la válvula convencional de interrupción.

Cuando se establece la conexión del tubo de extensión al colector, solamente es necesario hacer deslizar los extremos de las mangueras sobre los dos niples ahusados, tal como se muestra en la Fig. 269. El vacío que se produce durante el bombeo aprieta estas juntas deslizantes, evitando la entrada de aire. La disposición anterior evita el tener que usar conexiones roscadas y el acople puede efectuarse en cuestión de segundos.

A más de acelerar el trabajo, la unión giratoria flexible permite también situar la puntera a considerable separación, puesto que la distancia desde el colector al tubo de extensión de la puntera no es crítica en absoluto. Normalmente se usan mangueras de 90 cm. de largo en los sistemas estándar, pero en condiciones especiales pueden emplearse longitudes de hasta 4.5 y 6 m.

La colocación de un sistema de punteras para desecación equivale a una operación de línea de montaje. Los mismos pasos se repiten cientos de veces, por lo que aquellos contratistas conscientes del costo saben cuánto se puede economizar en la obra con sólo recortar unos 2 ó 3 minutos del tiempo requerido para cada operación.

Combinación de Bombas

La bomba de la puntera mostrada en la Fig. 266 es una bomba centrífuga combinada con una bomba auxiliar de vacío. Esta última se necesita para evacuar el aire del sistema recolector y hacer que el agua se eleve desde las punteras por presión atmosférica. Las bombas combinadas manejan también simultáneamente grandes cantidades de agua y aire mientras el sistema se halla en operación. Algunos de los pozos seguirán abatiéndose hasta que penetre aire, y casi siempre existirán en el sistema fugas de aire ocasionales. Cuando se hace necesario evitar que cualquier pozo absorba aire por excesivo abatimiento, se cierra parcialmente la válvula instalada en la unión giratoria.

Deberá planearse también qué destino se le va a dar al agua bombeada por el sistema

de desecación. Se puede utilizar como tubería de descarga, tubos de los que se usan en sistemas de riego, para conducir el agua hasta puntos de drenaje natural y así retirarla de las áreas de trabajo.

Los contratistas experimentados saben que los costos de las obras de desecación pueden reducirse mediante un planeamiento adecuado del trabajo y una esquematización del sistema, adiestrando buenas cuadrillas mediante una supervisión competente y utilizando las mejores punteras y equipo accesorio para completar las obras de desecación.

Capítulo 14

Desarrollo y Acabado de Pozos

EL DESARROLLO DE un pozo comprende todas aquellas etapas de su completación encaminadas a eliminar los materiales finos del acuífero y, como consecuencia, a limpiar, abrir o ensanchar los pasajes de la formación, de modo que el agua pueda entrar al pozo más libremente. El desarrollo constituye una labor esencial del verdadero acabado de un pozo de agua. Al ser desarrollado, éste alcanza su máxima capacidad.

Con ello, se obtienen casi en su totalidad, tres ventajas, a saber:

1. El desarrollo repara cualquier daño u obstrucción que haya sufrido la formación como consecuencia derivada de los efectos de la perforación.

2. El desarrollo aumenta la porosidad y la permeabilidad de la formación natural en los alrededores del pozo.

3. El desarrollo estabiliza la formación granular en torno a la rejilla, de manera que el pozo descarga agua libre de arena.

Todos los resultados mencionados se pueden obtener en los pozos perforados dentro de formaciones no consolidadas, si éstos se han enrejillado adecuadamente y se aplican correctamente los procedimientos de desarrollo. Las primeras dos ventajas pueden obtenerse también en aquellos pozos construídos en formaciones consolidadas, cuando los métodos utilizados resultan aplicables a este tipo de roca. El tercer punto no guarda relación con los pozos perforados en roca.

Un pozo acondicionado con una rejilla moderna, destinado a obtener agua de un acuífero arenoso, puede completarse de dos maneras, a saber: una mediante un desarrollo natural, con el que se logra que el procedimiento en sí utilice los mismos materiales del acuífero para formar una zona de alta permeabilidad en torno al pozo. En esta forma, se obtiene lo que se denomina un pozo desarrollado naturalmente. La completación de este tipo de pozo consiste en la eliminación de las partículas más finas de la formación acuífera, permitiéndoles entrar al pozo a través de las aberturas de la rejilla y ser luego extraídas por achicamiento o bombeo. El proceso de desarrollo debe continuarse hasta que cese el desplazamiento de los finos desde la formación y ésta se encuentre estabilizada, impidiendo así

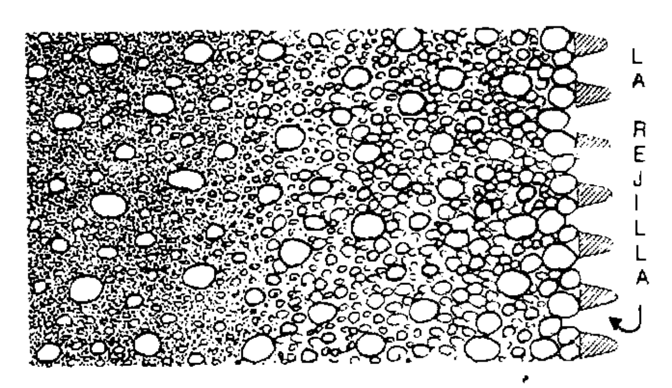


Fig. 272: Principio en que se basa el desarrollo natural de un pozo. Mediante el proceso, las partículas de limo y de arena fina son eliminadas de la formación acuífera. Los alcances del efecto que puedan lograrse dependen de las características de la arena, diseño de la rejilla y destreza del perforador.

cualquier movimiento posterior de la arena.

La remoción de las partículas más finas deja en su lugar una zona desarrollada naturalmente, constituida por arena o grava uniformemente gradada que rodea al pozo y tiene una alta porosidad y permeabilidad. En consecuencia, el agua puede desplazarse hacia el pozo a través de esta zona con una pérdida de carga casi despreciable. Ello da por resultado un menor abatimiento dentro del pozo.

Otra manera de proveer una envoltura de material granular altamente permeable alrededor de la rejilla, es por medio de un filtro artificial de grava. El procedimiento consiste en colocar adrede, grava artificialmente gradada, alrededor de la rejilla, en el espacio anular que expresamente se provee con este propósito.

Algunas personas argumentan que el desarrollo resulta innecesario cuando el pozo ha sido dotado de un filtro artificial de grava. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que sí debe efectuarse el trabajo de desarrollo si se desea obtener la máxima capacidad. El filtro artificial de grava crea un problema especial de desarrollo que se discutirá posteriormente en este mismo capítulo.

Sea cual fuere el tipo de pozo, el objetivo primordial del proceso de desarrollo es el de reparar cualquier daño temporal del acuífero. Todos los métodos de perforación obstruyen los poros de la formación en las inmediaciones del agujero, en mayor o menor grado. Esto se observa fácilmente en el método convencional de rotación, en el que el lodo que se utiliza en el procedimiento efectivamente sella la pared del agujero. Los otros métodos de perforación afectan en forma adversa y de una manera u otra la porosidad y la permeabilidad de la formación.

Cuando se hinca tubería de ademe por el método de percusión, se hace vibrar la arena alrededor de la tubería. Puesto que la vibración es una manera efectiva de compactar los materiales granulares, la operación de hincado acomoda la arena en forma más compacta y reduce su porosidad. Conociendo esto, los perforadores que usan la percusión tratan siempre de hacer descender el ademe dentro de la formación por medios de achicamiento, y solamente cuando es necesario, lo hincan.

Por lo general, se observa que las arenas y gravas de los acuíferos no consolidados han sido depositadas en forma suelta por los procesos de sedimentación. La distribución de los granos es a menudo tal, que la densidad es baja y la porosidad alta. Aunque son muy estables en su condición natural, estos materiales no consolidados pueden llegar a compactarse fácilmente cuando son alterados.

La perforación causa también cierta obstrucción de las aberturas en las rocas duras. Cualquier material que haya sido

obligado a penetrar dentro de las fracturas y fisuras de un acuífero constituído por roca dura, deberá ser luego eliminado mediante el desarrollo.

En la perforación por circulacion inversa, se utiliza agua como fluido de perforación, sin agregarle deliberadamente arcilla. Sin embargo, durante el proceso de perforación se incorporan algo de limo, arcilla y arena fina, provenientes de las formaciones que se estan atravesando. Estos materiales finos son luego recirculados junto con el agua, conforme la perforación prosigue.

Parte del agua se pierde dentro de la formación debido al exceso de presión de fluido que se debe ejercer para mantener libre el agujero. Conforme se pierde agua dentro de la formación, se van depositando en la pared del agujero cantidades variables de limo y arcilla que se han infiltrado. La acumulación de estas finas particulas termina por sellar la pared de la perforación. Este mismo efecto favorece no obstante la perforación misma, evitando la excesiva pérdida de agua.

La película de material que se deposita en la pared del agujero cuando se usa el método de circulación inversa, es eliminada más fácilmente que la pasta de lodo desarrollada por el fluído de perforación en el sistema rotatorio convencional. En cualquiera de ambos casos, tanto la película como la pasta deberán ser eliminadas mediante el desarrollo.

Por lo tanto, el resultado primordial de un buen desarrollo es la eliminación del inevitable "efecto pelicular" y el aflojamiento de la arena en derredor de la rejilla, para recuperar la porosidad perdida. El segundo objetivo busca superar aún esto y aumentar en forma sustancial la permeabilidad del acuifero en la vecindad del pozo. El comportamiento básico descrito, de un pozo desarrollado en forma natural, es un ejemplo de esta ventaja.

La tercera ventaja que se obtiene como resultado del desarrollo se comprende en forma más objetiva, observando lo que sucede a través de una serie de zonas cilíndricas de un acuífero arenoso que rodee a un pozo. En la zona inmediata al exterior de la rejilla, el desarrollo elimina las partículas cuyo tamaño es menor que las aberturas de ésta, dejando en su lugar, solamente el material más grueso. Un poco más allá, algunos granos de tamaño mediano, permanecen mezclados con los granos gruesos. Por fuera de esta zona, el material se acomoda gradualmente hasta adquirir el carácter original de la formación acuífera. Es así como el desarrollo estabiliza a la formación creando una sucesión de zonas de material gradado alrededor de la rejilla, hasta que no se manifieste ningún movimiento posterior de la arena. En estas condiciones, el pozo terminado descargará agua libre de arena, a su mayor capacidad.

El escoger el tamaño o tamaños correctos de las aberturas de la rejilla es esencial para lograr éxito en el desarrollo del pozo. Estos tamaños de las aberturas se escogen de modo que permitan retirar la proporción que se desee del material fino.

En muchos tipos de formación, es una práctica muy común el escoger una abertura

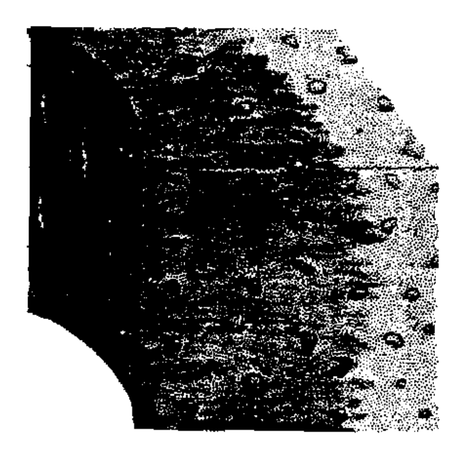


Fig. 273: El fluido que se utiliza en la perforación por rotación, obstruye la formación y forma una pasta impermeable de lodo que debe ser eliminada luego mediante el desarrollo.

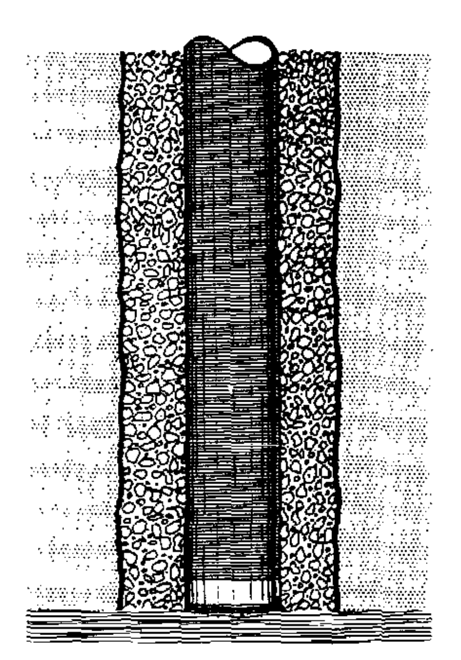


Fig. 274: El "efecto de película" es el resultado inevitable de cualquier perforación, y sella parcial o completamente la pared del agujero.

que retenga alrededor de un 50 por ciento de la arena. Cuando la gradación es menos uniforme y contiene un amplio rango de partículas finas a gruesas, se pueden escoger aberturas relativamente mayores que permitan remover por desarrollo mayor cantidad de finos. Cuando la arena de la formación es de gradación uniforme, la elección debe ser más conservadora. Cuando en la formación se alternan estratos finos y gruesos, se amerita la intervención de un ingeniero o geólogo experimentado para obtener los mejores resultados. Estos aspectos se discuten en detalle en el Cap. 10, en relación con el diseño de pozos.

El tamaño de la abertura es el que decide hasta dónde puede extenderse el trabajo de desarrollo. Obviamente, existe un límite para la cantidad de arena que puede dejarse pasar a través de la rejilla. Mucha eliminación podría dar lugar a un asentamiento de los materiales sobreyacientes, lo que a su vez puede producir efectos inconvenientes en el pozo.

Cuando las aberturas de la rejilla son muy pequeñas, el rendimiento del pozo, por otra parte, puede quedar limitado por un desarrollo inadecuado. Cuando no se llega a obtener la máxima porosidad, puede presentarse una cementación o incrustación debidas a una velocidad de flujo anormalmente alta, cerca del agujero.

El filtro artificial de grava causa un problema especial de desarrollo, que se discutirá luego en este mismo capitulo.

Acomodo en Arco de los Granos de Arena

Lo que fundamentalmente se trata de lograr con el desarrollo, es la inversión del flujo a través de las aberturas de la rejilla, para así reacomodar las partículas de la formación. Esto es esencial para romper la forma de arco en que ciertos grupos de partículas se acomodan. La Fig. 277 muestra cómo las partículas pequeñas pueden acomodarse entre las más grandes, y a través de las aberturas de la rejilla, cuando el flujo del agua tiene lugar en una sola dirección. Al invertir la dirección del flujo mediante algún tipo de agitación, se elimina esta tendencia. El flujo durante la agitación rompe el efecto de arco, y el aflujo a la rejilla desplaza el material fino hacia ésta y lo atrae al pozo.

Agitación Mecánica

Una manera efectiva de agitar el agua dentro de un pozo, es la de desarrollar la formación acuífera mediante el desplazamiento hacia arriba y hacia abajo por dentro del ademe, de un émbolo, a la manera de un pistón dentro de un cilindro. La herramienta que corrientemente se utiliza se denomina émbolo de agitación o bloque de pistoneo. Podría también usarse una cuchara pesada de achicar, pero ésta no resulta tan efectiva como un émbolo bien ajustado.

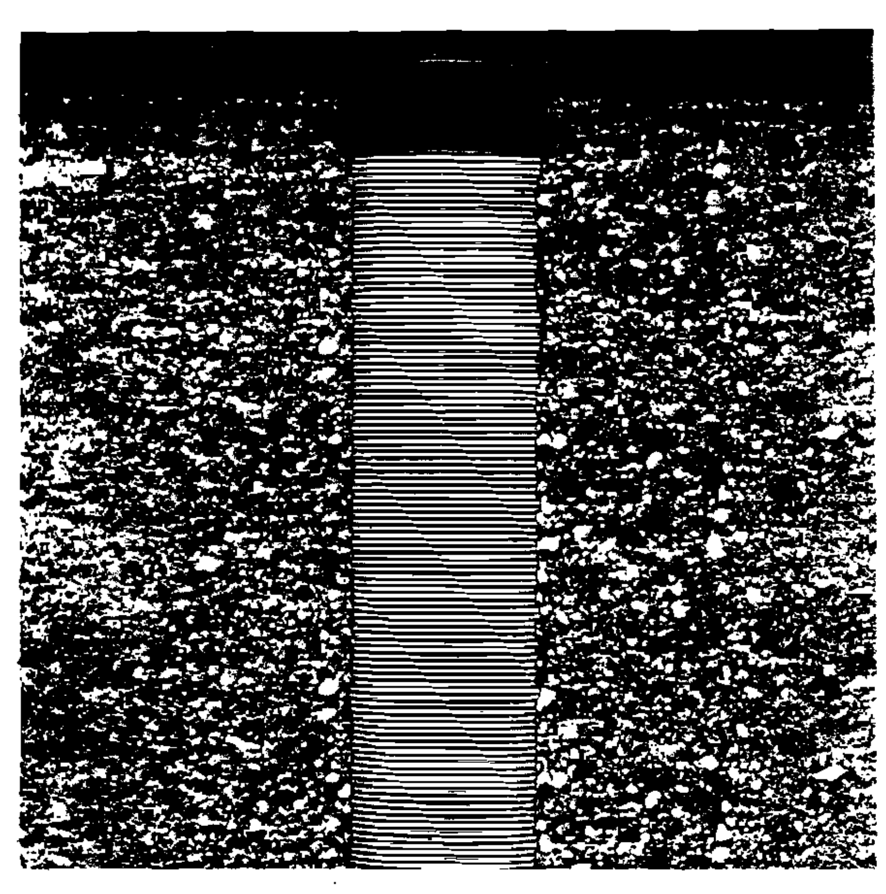


Fig. 275: Una vez eliminado el efecto de película producido por la perforación, el desarrollo remueve todas las partículas cuyo tamaño sea menor que las aberturas de la rejilla. Las partículas más gruesas, con su porosidad y permeabilidad aumentadas, rodean entonces a la rejilla, como en ésta de fabricación Johnson, instalada en un pozo desarrollado por vía natural.

Muchos perforadores confían grande o totalmente en los émbolos para desarrollar los pozos con rejilla. Algunos otros creen que este dispositivo no es efectivo y que incluso, en algunos casos, puede ser perjudicial. No obstante, el bloque de pistoneo es la herramienta que más se usa para el desarrollo, especialmente por los perforadores de percusión.

El bloque de pistoneo difiere de un succionador, en que este último se hace descender por dentro del ademe hasta un punto escogido por debajo del nivel del agua y luego se hala para producir un flujo hacia adentro del pozo, pero sin invertirlo y dejando así de producir el efecto agitador. Este efecto de succión se usa muy corrientemente de esa manera cuando se desea limpiar de materiales finos los pozos que se perforan en acuíferos de roca consolidada, pero con poca frecuencia en aquellos pozos dotados de rejilla.

Los bloques de agitación producen algunas veces efectos inconvenientes cuando el acuífero contiene venas de arcilla o bolas del mismo material. La acción del émbolo

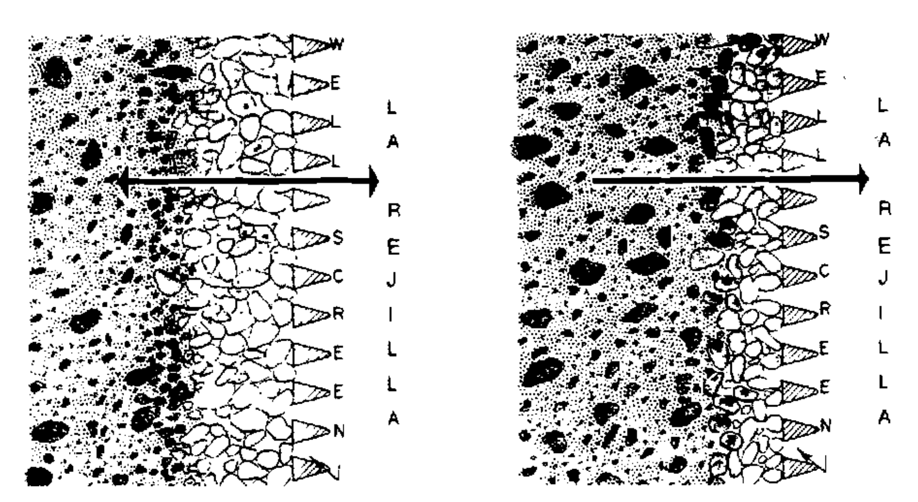


Fig. 276: Una acción efectiva de desarrollo, exige el mover el agua hacia adentro y hacia afuera de la rejilla. El desplazamiento del agua en una sola dirección, tal como cuando solamente se bombea el pozo, no produce el efecto de desarrollo apropiado. La inversión del flujo rompe el acomodo en forma de puente de los granos de arena.

puede causar que la arcilla se adhiera a la superficie de la rejilla. Cuando esto ocurre, el rendimiento tiende a reducirse en lugar de aumentar. Se presenta también un peligro, y es el que la agitación por este método puede producir altas diferencias de presión que podrían ocasionar el colapso de la rejilla, si ésta se halla parcial o totalmente obstruida por arcilla o lodo.

El bloque de pistoneo no debe emplearse, a menos de que se haya establecido un flujo libre de agua suficiente como para que la herramiento se desplace suave y libremente. Debe utilizarse con especial cuidado si la formación sobreyaciente consiste principalmente de arena fina, limo o arcilla suave.

En suma, que un bloque de pistoneo es una herramienta de bajo costo, que resulta conveniente usar. Es predilecta de los perforadores que la han utilizado con éxito. Dentro de sus limitaciones, y bajo condiciones apropiadas del pozo, puede realizar un trabajo eficiente.

Los bloques de agitación pueden ser de dos tipos; a saber: el émbolo sólido y el que contiene aberturas acondicionadas con válvulas. El segundo proporciona una agitación menos violenta que el de tipo sólido. Esto constituye una ventaja al desarrollar formaciones compactas, puesto que siempre resulta mejor iniciar la agitación más levemente y aumentar la fuerza que la produce, conforme continúa el desarrollo. Si se taponan las aberturas de un émbolo acondicionado con válvulas, se puede convertir a éste en uno del tipo sólido y utilizarlo así cuando se necesita una fuerza de agitación mayor.

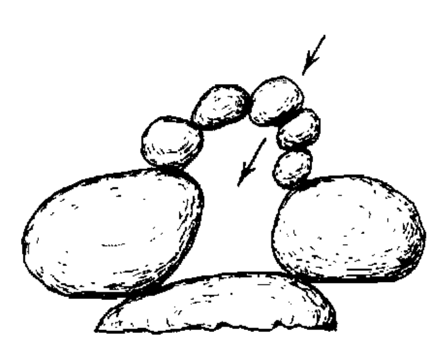


Fig. 277: Los arcos constituidos por granos de arena pueden salvar las aberturas sin ser quebrados durante el desarrollo, si el flujo es únicamente en una sola dirección.

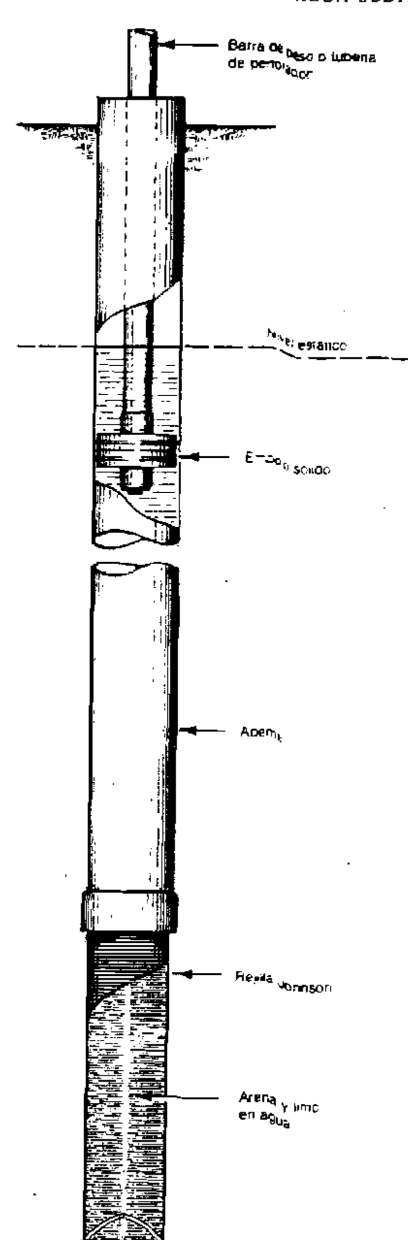


Fig. 278: El bloque para pistoneo constituye una herramienta efectiva para el desarrollo de un pozo. Se adapta en forma muy particular para utilizarlo con un equipo de percusión, pues su descenso hace que el agua penetre dentro de la formación; al ascender el agua, el limo y la arcilla, son atraídas hacia el pozo a través de las aberturas de la rejilla.

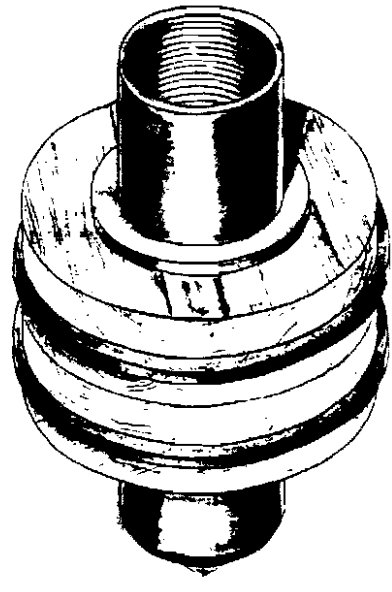


Fig. 279: Émbolo característico de agitación del tipo sólido.

Debe agregarse suficiente peso al bloque de agitación, para lograr que éste descienda fácilmente. Un error muy común que se comete en el empleo de esta herramienta es el de no dotarla del peso suficiente. Una barra de peso o una sarta pesada de tubos, pueden suministrar el peso que se requiere.

La Fig. 279 muestra un tipo de émbolo que fácilmente se puede construir en la mayor parte de los talleres. Se colocan dos discos de cuero o de faja de hule, entre unos discos de madera, armando el conjunto alrededor de un manguito de tubería extra resistente, acondicionado con placas de acero que sirven como arandelas por debajo de las uniones roscadas de los extremos. Los discos de madera deberán ser de piezas contrachapadas que no se partan. Los discos de cuero o de hule deberán entrar ajustadamente en el ademe del pozo.

Antes de empezar a producir la agitación, deberá achicarse el pozo para asegurarse de que algo de agua penetra al mismo y para eliminar cualquier arena que se hubiese sedimentado dentro de la rejilla.

Empleo del Embolo

El procedimiento que se describe a continuación, es característico, y se explicará paso por paso.

Hágase descender el émbolo dentro del pozo, hasta que se halle a unos 3 a 4.5 m. por debajo del nivel del agua, pero por encima del extremo superior de la rejilla. Cuando menos, manténgaselo a unos pocos metros por sobre la rejilla, de modo que no golpée en el empaque de plomo. La columna de agua es la que transmite la acción del émbolo al intervalo de la rejilla.

Si se está utilizando una máquina de perforar por percusión, debe colocarse el movimiento del brazo de la excéntrica en una carrera larga. Empiécese luego a agitar lentamente, aumentando después en forma gradual la velocidad, manteniéndola dentro del límite en el cual el émbolo se levanta y cae sin sacudidas. Resulta inútil hacer funcionar la máquina a una mayor velocidad que aquella a la cual desciende el émbolo. Si se está utilizando una máquina rotatoria, deberá levantarse el émbolo a unos 0.90 a 1.20 m., antes de dejarlo caer. Debe regularse el movimiento mediante el freno de izar y el freno de fricción, si es el cable de achicar el que soporta la herramienta; si no es así, diríjase el émbolo, manipulando una cuerda con el cabrestante.

Continúese la agitación durante varios minutos, extrayendo del pozo el émbolo e introduciendo luego la cuchara o la bomba de arena hasta la rejilla. Cuando la cuchara achicadora descanse sobre la arena que haya entrado a la rejilla, verifíquese la profundidad de aquélla, en metros, efectuando mediciones a lo largo del cable de achicar. Llévese un registro de la cantidad de arena. Repítase luego la agitación, y compárese el volumen con el que penetró a la rejilla la primera vez. Extráigase la arena, repitiendo la agitación y el achicamiento, hasta que muy poca o nada, penetre al pozo.

Alárguese el período de agitación conforme la cantidad de arena disminuye cada vez. El período de desarrollo que podría necesitarse puede variar desde unas dos horas en los pozos pequeños, hasta dos o tres días en los pozos grandes con rejillas largas.

Una parte considerable del éxito que pueda lograrse en el trabajo, depende de la cuchara y de la forma de achicar. Los resultados que se obtienen son mejores cuando el achicamiento es completo. El tipo de cuchara que generalmente se prefiere para realizar este trabajo, es el de bomba de arena acondicionada con un buen émbolo y con una válvula de fondo para vaciado.



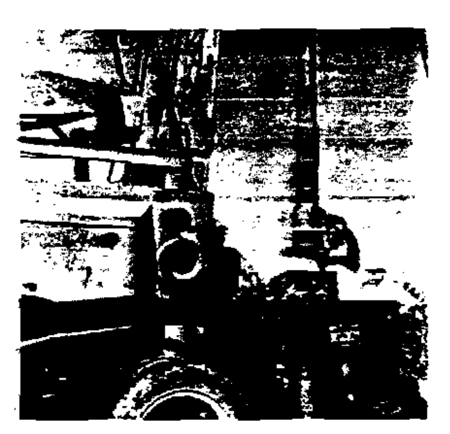


Fig. 280: Conexión de una barra pesada de perforar al bloque de agitación e introducción de la herramienta en un ademe de 40 cm. de diámetro.
(Cortesía de Bergerson-Caswell, Inc.)



Fig. 281: Bloque de doble émbolo, utilizado en el desarrollo de un pozo de 30 cm.; la arena atraída en 15 minutos de agitación, es achicada del pozo.

Cuando esta herramienta se maneja adecuadamente, se puede realizar una labor de primera clase en cuanto a limpieza de la rejilla. Una cuchara achicadora relativamente grande, resulta mejor, especialmente si se hace funcionar como una herramienta agitadora por dentro de la rejilla, para recoger al mismo tiempo la arena que se hubiese depositado en el fondo de aquélla.

El tiempo de agitación debe regularse cuidadosamente para evitar el continuar con ésta, cuando se haya depositado una considerable cantidad de arena dentro de la rejilla. El efecto producido por la agitación se concentra mayormente en el extremo superior de la rejilla, y ello se acentúa más si una buena parte del intervalo inferior de ésta se bloquea continuamente por la acumulación de arena que haya entrado como resultado del desarrollo.

Embolo del Tipo de Válvulas

El émbolo del tipo de válvulas hace que el agua penetre a la rejilla, en la misma forma que el émbolo sólido durante su carrera ascendente, pero la agitación que provoca es más moderada, puesto que una parte del agua pasa a través de las aberturas del émbolo. En consecuencia, menos cantidad pasa a la formación cuando el agua es empujada a través de las aberturas de la rejilla.

En ciertas condiciones, la columna de agua que se encuentra por encima del émbolo, puede llegar alcanzar un punto, en que la carrera ascendente del émbolo haga que el agua derrame por la boca del ademe. Esta no es una característica esencial, pero puede contribuir a la expulsión de una parte del limo y de la arena que se acumula en el pozo, conforme la operación continúa.

Debe tenerse cuidado cuando se bombea arena conjuntamente con el agua, para evitar que la primera aprisione el émbolo dentro del ademe. Es muy remoto el peligro de que esto ocurra, si el émbolo se mantiene en movimiento. Constituye una buena práctica,

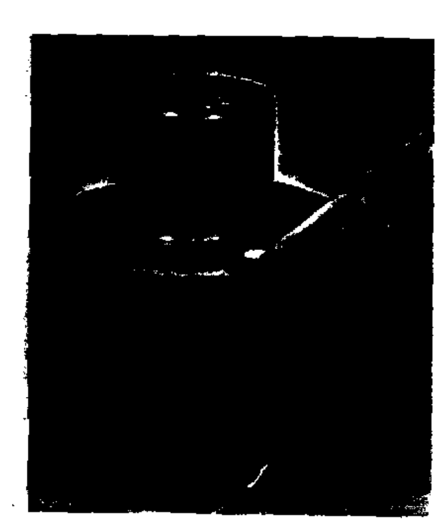


Fig. 282: Embolo característico del tipo de válvulas.

el continuar con el movimiento de sube y baja aun cuando se esté arrollando el cable para extraer el émbolo del pozo.

En un pozo acondicionado con una rejilla larga, puede resultar más efectivo operar el émbolo dentro de la rejilla misma, de modo de poder concentrar su efecto en varios niveles. Esta práctica contribuye a desarrollar el pozo a lo largo de la longitud de la rejilla. Algunos perforadores la han empleado con buenos resultados.

No es necesario ni de desear, que el émbolo se construya de un tamaño que ajuste apretadamente en la rejilla. Este debe de pasar fácilmente por dentro de la misma o de sus accesorios. Cuando se provoca la agitación dentro de la rejilla, debe de tenerse cuidado en evitar que la herramienta quede aprisionada por la arena, lo que podría suceder, si ésta ha llegado a rellenar por encima del émbolo.

La agitación podría causar movimiento vertical del agua, por fuera del ademe, si la acción de lavado llega a romper el sello en derredor de éste, colocado en los estratos superiores. Cuando se manifiesta alguna indicación de que ello está ocurriendo, debe suspenderse el uso del émbolo.

Agitación con Aire

El aire comprimido puede utilizarse con eficacia, como una herramienta de desarrollo. Muchos son los perforadores que llevan a cabo con aire, todos sus trabajos de desarrollo. Para lograr lo anterior, se utiliza un eyector de aire con su tubería de inyección por dentro del tubo eductor o de bombeo, instalada dentro del pozo.

El equipo que se necesita para la aplicación de este procedimiento, es el siguiente:

- Un compresor de aire y su tanque, del tamaño apropiado.
- Tubería de bombeo y de aire dentro del pozo, con medios de levantar y hacer descender cada una independientemente.
- Una manguera de aire, flexible, de alta presión, que permita levantar y bajar la línea de aire dentro del pozo.
- Un manómetro y una válvula de alivio como precaución contra una sobrecarga accidental.
- Una válvula de abertura rápida a la salida del tanque, para regular el flujo de aire

El compresor deberá estar en capacidad de desarrollar una presión no menor de 7 Kg./cm^2 y preferiblemente de 10 Kg./cm^2. Una regla empírica, aproximada pero útil, para determinar la capacidad apropiada del compresor, es la de disponer de unos 5.6 l. de aire libre, por cada litro de agua, de la descarga prevista de bombeo.

La salida del compresor debe conectarse al tanque de manera tal que se lleve a un mínimo la resistencia al flujo del aire. La tubería de salida, que va desde el tanque al pozo, deberá ser de un tamaño igual o mayor que la línea de aire que se instale en el mismo. La válvula de apertura rápida debe conectarse en un punto conveniente. La conexión entre la tubería de salida del tanque y la línea de aire dentro del pozo se hace por medio de una manguera de alta presión. Esta manguera deberá ser de una longitud de por lo menos 4.5 m., para que permita mover hacia arriba y hacia abajo, el conjunto.

La Fig. 283 muestra la manera correcta de colocar la tubería eductora o de bombeo, y la de aire, dentro del pozo. La tubería de educción es manipulada fácilmente por medio del cable de perforar o el de izar, en tanto que la de aire se maneja separadamente con el cable de achicar o con otro de que se disponga. En la salida lateral, de una te colocada en el extremo superior de la tubería de educción, se instala un tubo de descarga. Al extremo superior de la te, se enrosca una unión reductora, con su abertura

interior suficientemente grande como para permitir un fácil acoplamiento de la tubería de aire. Para reducir la aspersión de agua alrededor del extremo superior del pozo, se

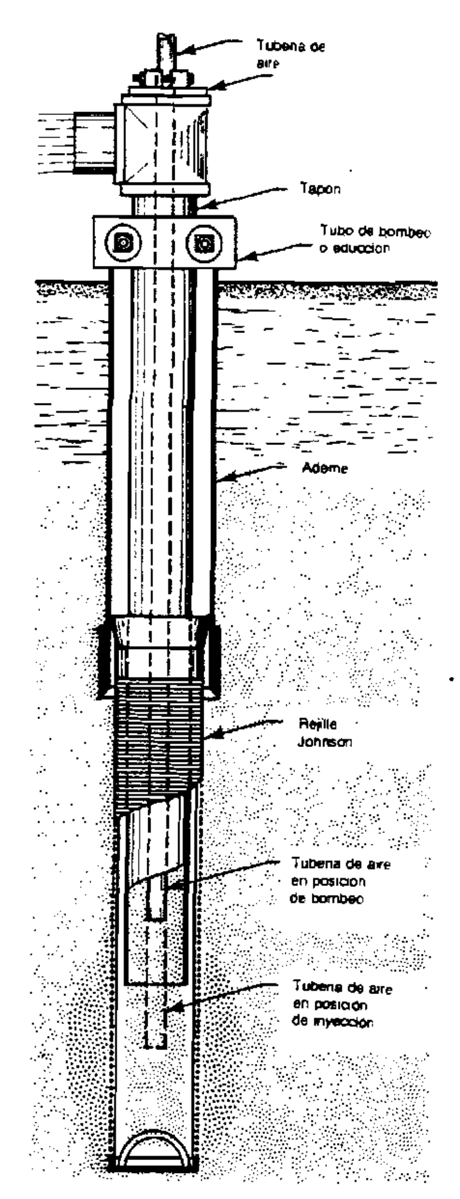


Fig. 283: La acción agitadora puede ser producida con un compresor de aire, utilizando para ello un eyector modificado.

arrolla cáñamo o algún material similar, alrededor de la línea de aire justamente por encima de la te.

La Tabla XXX muestra los diámetros recomendados de tubería de bombeo o de educción, y de aire, que deben emplearse en diversos tamaños de pozos.

Por razones prácticas estos tamaños pueden sufrir alguna variación, pero las combinaciones sugeridas dan por lo general buenos resultados.

El desarrollo por aire comprimido produce óptimos resultados cuando la relación de sumergencia de la línea de aire es de alrededor de un 60 por ciento. Esto equivale a la proporción de línea de aire que se halla por debajo del nivel del agua cuando se está bombeando.

Para calcular la sumergencia, se divide la longitud de la línea de aire que se encuentra por debajo del agua, por su longitud total. Si, por ejemplo, la línea de aire tiene una longitud total de 60 m. y el nivel estático del agua se halla a 20 m. por debajo del terreno, la longitud sumergida es de 40 m. La relación de sumergencia estática será entonces de: 40/60 = 0.66 ó 66 por ciento. Si la inyección de aire da comienzo y el nivel de agua desciende hasta 24 m., la longitud sumergida será esta vez de 36 m., y la relación de sumergencia dinámica resulta ser de:

$$36/60 = 0.60, \text{ o sea, } 60 \text{ por ciento.}$$

Aún con una sumergencia tan baja como 30 por ciento, un perforador diestro puede obtener resultados razonablemente buenos.

Antes de expulsar del pozo cualquier cantidad de agua o fluído de perforación con una súbita inyección de aire, se debe aplicar la inyección de modo que se extraiga el agua lentamente del pozo. Se procede de este modo para cerciorarse de que el agua del acuífero está entrando al pozo de manera que no se produzca una excesiva diferencia de presión cuando se lanzan dentro del pozo grandes volúmenes de aire durante la

Tabla XXX
Diámetros de Tubería para Inyección de Aire

Caudal de Bombeo Litros/minuto	Diámetro del Ademe cm.	Diámetro de la Tubería de Educción cm	Diámetro del Tubo de Aire cm.
100 a 230	10.0	5.0	1.25
230 a 300	12.5	7.5	2.5
300 a 380	15.0	9.0	2.5
380 a 570	15.0	10.0	3.2
570 a 950	20.0	12.5	3.8
950 a 1.500	20.0	15.0	5.0
1.500 a 2.650	25.0	20.0	6.3

agitación. Cuando sólo se trata de bombear, la línea de aire únicamente necesita introducirse un poco para tener adecuada sumergencia.

Al dar inicio al desarrollo, se hace descender la tubería de aire unos 60 cm. por debajo del extremo inferior de la rejilla. La línea de aire se coloca de modo que su extremo inferior quede situado a unos 30 cm. o más, por encima del extremo inferior de la tubería de educción. Seguidamente, se inyecta aire a la línea correspondiente, y se bombea el pozo de la manera convencional del procedimiento, hasta que el agua parezca estar libre de arena. A continuación, se cierra la válvula instalada a la salida del tanque, permitiendo que la presión del aire dentro de éste suba hasta 7 o 10.5 Kg./cm^2. Entretanto, se hace descender la tubería de aire de modo que su extremo inferior quede situado a unos 30 cm. o algo así, por debajo del extremo inferior de la tubería de descarga. Acto seguido se abre rápidamente la válvula, permitiendo así que el aire contenido en el tanque irrumpa súbitamente en el pozo. Esto tenderá a desplazar el agua hacia afuera, a través de las aberturas de la rejilla. Por lo general, una corta, pero enérgica carga de agua, rebosará al mismo tiempo o será lanzada fuera del ademe y de la tubería de bombeo, hacia la superficie del terreno. Si la tubería de aire es levantada por dentro del tubo de bombeo, una vez que la primera carga de aire es lanzada dentro del pozo, el eyector de aire bombeará de nuevo, invirtiendo el flujo y completando así el ciclo de agitación.

El pozo se bombea por inyección de aire durante un tiempo corto, lanzando una nueva carga de aire con la tubería situada por debajo del tubo de educción y levantando de nuevo la línea de aire, para que prosiga el bombeo. Estos ciclos de agitación se repiten hasta que el agua se halle relativamente libre de arena o de otras partículas finas. Cuando esto tiene lugar, el desarrollo está llegando a su término, en la región cercana al extremo inferior de la tubería de inyección.

Luego se levanta el conjunto hasta una posición situada a unos pocos metros más arriba, y se repiten las mismas operaciones. De esta manera, se logra desarrollar en intervalos consecutivos, toda la longitud de la rejilla. Finalmente, todo el conjunto para inyección de aire, se hace descender hasta su posición original cerca del fondo del agujero, y se opera eual si fuera una bomba, para eliminar cualquier cantidad de arena que se hubiese acumulado dentro de la rejilla.

El perforador de pozos que ejecute este trabajo puede hacer variar algunos detalles del procedimiento, de modo que en cada pozo se obtengan las mayores ventajas tanto de la agitación como del bombeo. No existe rutina de procedimiento que pueda sustituir a la destreza que el perforador haya adquirido de su propia experiencia práctica.





Fig. 284: Desarrollo de un pozo de 20 cm., utilizando aire comprimido y una disposición modificada de inyección de aire.

Sobrebombeo

El método de ''sobrebombeo'' constituye el procedimiento más sencillo para eliminar los finos de la formación acuífera. El sobrebombeo implica el bombear el pozo a un caudal mayor que el que se vaya a extraer al ponerlo en servicio. Esto tiene cierta ventaja, puesto que cualquier pozo que se halla en capacidad de ser bombeado a un caudal mayor puede bombearse a una razón menor sin ningún peligro o dificultad.

Sin embargo, se le han hecho objeciones a este método de desarrollo que, por lo general, se han pasado por alto. El sobrebombeo puede ocasionar que algunos de los granos de arena queden suspendidos en forma de arco dentro de la formación, y por lo tanto, que ésta se halle estabilizada sólo parcialmente, además de que el sobrebombeo necesita por lo general, de un equipo de bombeo de gran capacidad que no siempre se encuentra convenientemente disponible.

Resulta una cuestión muy sencilla el sobrebombeo de pozos pequeños o de acuíferos pobres, pero cuando se deben de extraer grandes cantidades de agua, puede que sea difícil obtener un equipo de amplia capacidad a un costo razonable. El mismo equipo que se pretende utilizar regularmente en el pozo puede emplearse para realizar el sobrebombeo. Dependiendo del tipo de bomba, ello puede lograrse ya sea operando ésta a una velocidad mayor, o permitiendo que la misma descargue en la superficie, a una presión menor que la presión normal de operación.

Existe una seria objeción a que se lleve a cabo este trabajo mediante el uso de la bomba permanente. Si se va a extraer una



Fig. 285: Desarrollo por aire de un pozo enrejillado, de 50 cm., en Columbia Británica, Canadá.
(Cortesía de Pacific Water Wells)

cantidad considerable de arena junto con el agua, la bomba estará sometida a un desgaste excesivo, lo que reduce su eficiencia. En condiciones muy severas, la bomba podría quedar aprisionada por la arena. Si esto ocurre, la bomba deberá ser retirada, desarmada y limpiada cuidadosamente, antes de volverla a poner en servicio.

El sobrebombeo, por sí mismo, rara vez alcanza un resultado óptimo ni la estabilización total de la formación acuífera.

Procedimientos de Contralavado

El efecto agitador o la inversión de flujo necesarios para desarrollar la formación, se pueden obtener mediante tres o cuatro métodos de contralavado. Uno de los métodos consiste en levantar, por bombeo, el agua en forma alternada, hasta la superficie y dejar luego que caiga de nuevo en el pozo a través de la columna de la bomba.

Quizá el único tipo de bomba, aparte de la inyección de aire, que podría utilizarse prácticamente para este propósito, es la bomba de turbina vertical, sin la válvula de pie. La bomba empieza a funcionar, pero tan pronto como el agua es levantada hasta la superficie del terreno, se debe interrumpir su funcionamiento. En esta forma, el agua contenida en la columna de la bomba desciende bruscamente. Se vuelve a poner en funcionamiento la bomba, y de nuevo se hace detener tan rápido como lo permitan el motor y los mecanismos de arranque. El efecto que se logra es el de un ascenso y descenso intermitente del nivel del agua dentro del pozo, lo que produce un aflujo y eflujo a traés de las aberturas de la rejilla.

Durante el proceso, puede bombearse normalmente el pozo de vez en cuando para expulsar la arena que haya sido atraída por la agitación producida.

El método que se ha descrito se denomina a menudo ''azotar'' el pozo. Algunos pozos responden satisfactoriamente a su aplicación, pero el efecto agitador no es lo

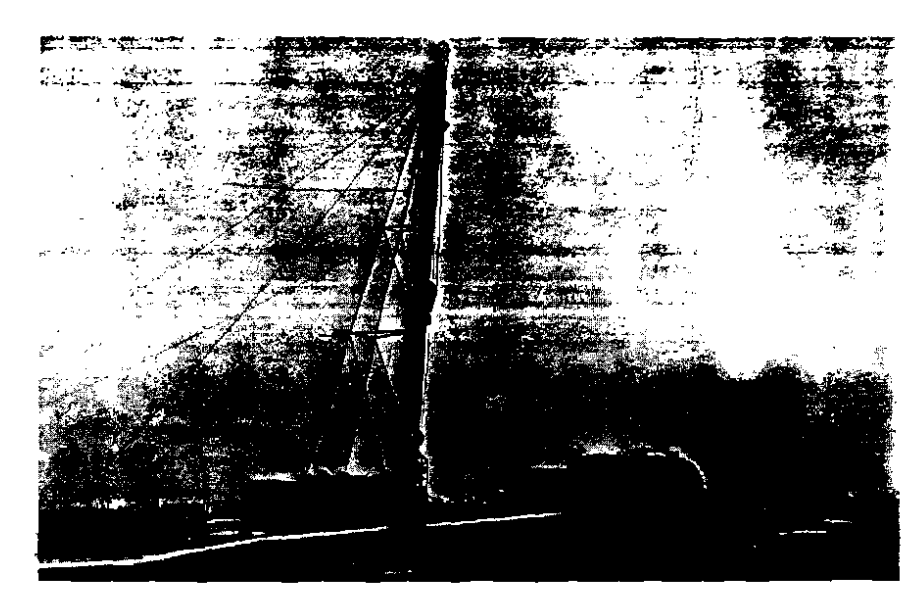


Fig. 286: Desarrollo de un pozo acondicionado con filtro de grava, por el procedimiento de contralavado. El agua es almacenada dentro de un gran tanque, y luego se le permite fluir dentro del pozo, para producir el efecto de agitación.
(Cortesía de Keys Well Drilling Co.

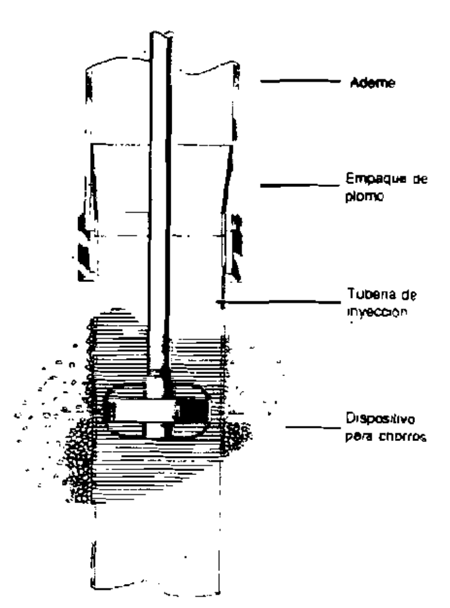


Fig. 287: El procedimiento de chorros horizontales de alta velocidad crea una turbulencia alrededor de la rejilla, que afloja con efectividad los materiales finos y los atrae hacia el pozo.

suficientemente vigoroso como para obtener, en la mayoría de los casos, los resultados óptimos.

Los resultados obtenidos en un pozo de 30 cm. en Illinois, brindan un ejemplo muy palpable de esta situación. El ademe de 30 cm. de diámetro fue llevado hasta los 64 m. de profundidad. Se instaló luego una rejilla de pozo de 4.6 m. de longitud, con aberturas del No. 60 (0.60 pulgadas, 1.52 mm.), retrayendo enseguida el ademe de 30 cm. para dejar expuesta la rejilla frente a una formación de arena gruesa.

El nivel estático del agua se hallaba a 4.6 m. desde la superficie. Luego se instaló una bomba de turbina dentro del pozo. Después de unos cuantos ciclos de poner a funcionar e interrumpir la bomba, se obtuvo una descarga de 190 l. por minuto con un abatimiento de 49 m.

Como esto pareciera no resultar efectivo, se retiró la bomba y se desarrolló el pozo mediante agitación y achicamiento. La prueba de bombeo de 24 horas de duración que se realizó a continuación, dio un rendimiento de 3,785 l. por minuto con un abatimiento de solamente 15.5 m.

Debe tenerse siempre cuidado de no trabajar sumamente rápido, por el peligro de que la bomba quede aprisionada por la arena. El bombeo debe iniciarse a capacidad reducida, y aumentarse gradualmente hasta plena capacidad, antes de dar comienzo a la agitación.

Cuando el nivel estático se encuentra suficientemente alto como para que permita bombear mediante altura de aspiración, puede adoptarse otro procedimiento de contralavado, utilizando para esto una bomba centrífuga portátil que tome el agua del pozo y la haga recircular por éste mismo. La bomba puede ser del tipo que se emplea en trabajos de construcción. Se conecta a la descarga de la bomba, una sarta de tubos la que a su vez se introduce en el pozo hasta casi toda su profundidad. Luego, se bombea agua del pozo y se hace recircular de nuevo dentro de éste, por dentro de la sección acondicionada con rejilla. La turbulencia que así se crea dentro del pozo, contribuye a desarrollar éste.

Chorro de Alta Velocidad

El empleo de un chorro de agua a alta velocidad es, quizá por lo general, el mejor método para desarrollar un pozo. Este método tiene las siguientes ventajas primordiales:

- La energía se concentra sobre una área pequeña, con una efectividad consecuentemente mayor.
- Cada parte de la rejilla puede ser tratada en forma selectiva, y se logra un completo desarrollo si sus aberturas se hallan muy próximas y son de la forma adecuada para que el chorro pueda ser dirigido hacia el material de la formación, en forma radial.
- Resulta muy sencillo de aplicar, y no es susceptible de causar problemas si se usa en demasía.

Los principales elementos del equipo que se requiere, consisten de un sencillo dispositivo para producir el chorro, conjuntamente con una bomba de alta presión y la manguera y tubería necesarias. La enérgica acción de los chorros de agua de alta velocidad que salen por las aberturas de la rejilla, agitan y reacomodan las partículas de la formación que rodea a la misma. La película de lodo depositada en el agujero cuando se emplea el método convencional de perforación por rotación es efectivamente desprendida y dispersada de modo que el lodo de perforación se puede extraer fácilmente por bombeo.

La acción del chorro de agua puede también reparar el daño causado a la formación, por cualquiera de los otros métodos de perforación.

El procedimiento consiste en hacer funcionar un eyector horizontal por dentro del pozo, en forma tal que los chorros de agua de alta velocidad, salgan por las aberturas de la rejilla. Haciendo girar lentamente el eyector, y subiendo y bajando éste, se logra aplicar la vigorosa acción del chorro a toda la superficie de la rejilla. Resulta conveniente el empleo de un eslabón giratorio para conectar la manguera a la tubería. Para hacer girar la tubería, se emplea una abrazadera fijada a ésta y provista de una asa. Las aberturas de la rejilla, de un diseño adecuado, permiten que el chorro realice su cometido.

La arena fina, el limo y la arcilla, son así eliminados de la formación acuífera, y la turbulencia creada por los chorros de agua arrastra estos materiales finos hacia el pozo a través de aquellas aberturas de la rejilla, que se hallen situadas por encima y por debajo del punto de operación.

Cuando esto es posible, sería de desear que se bombee el pozo ligeramente, al mismo tiempo que se está aplicando el chorro de alta velocidad. Esto no es siempre posible, pero debería hacerse cuando el diámetro del pozo, el equipo disponible, y la posición del nivel estático del agua, lo permitan.

Al operar, el procedimiento del chorro agrega agua al pozo a una velocidad que depende del tamaño de los eyectores, y de la presión desarrollada por la bomba. Si el caudal extraído del pozo es mayor que el que se está inyectando a éste, el nivel del agua se mantendrá por debajo del nivel estático y cierta cantidad de agua proveniente de la formación entrará al pozo a través de las aberturas de la rejilla, conforme el trabajo prosigue. El movimiento del agua dentro del pozo ayuda a eliminar parte del material aflojado por la acción del chorro.

Una de las ventajas adicionales del bombeo es la de que el agua extraída del pozo, constituye un abastecimiento continuo que puede hacerse recircular por medio de la bomba y de los eyectores. La arena fina que sale del pozo puede sedimentarse en un tanque o en un foso de sedimentación, y evitar así que se dañen tanto la bomba de alta presión como las boquillas del eyector.

El equipo que se necesita para efectuar el desarrollo por aplicación de chorro consiste de un eyector de dos o más boquillas, una bomba de alta presión, conexiones y manguera de alta presión, una sarta de tubos y un tanque de agua u otro tipo de abastecimiento de ésta. Cuando las condiciones permiten su empleo, debe agregarse una bomba o algún sistema de inyección de aire, para extraer agua del pozo mientras se aplica el chorro.

La Fig. 288 muestra un sencillo tipo de herramienta o dispositivo para la aplicación del chorro, constituído por 4 boquillas. Si se usan 2 boquillas, éstas deberán separarse a 180 grados; a 120 grados, cuando se utilizan 3 boquillas, y si éstas son 4 deberán colocarse a 90 grados de separación, para balancear hidráulicamente el dispositivo durante la operación. Los resultados óptimos se obtienen si las boquillas se diseñan para una máxima eficiencia, pero los agujeros

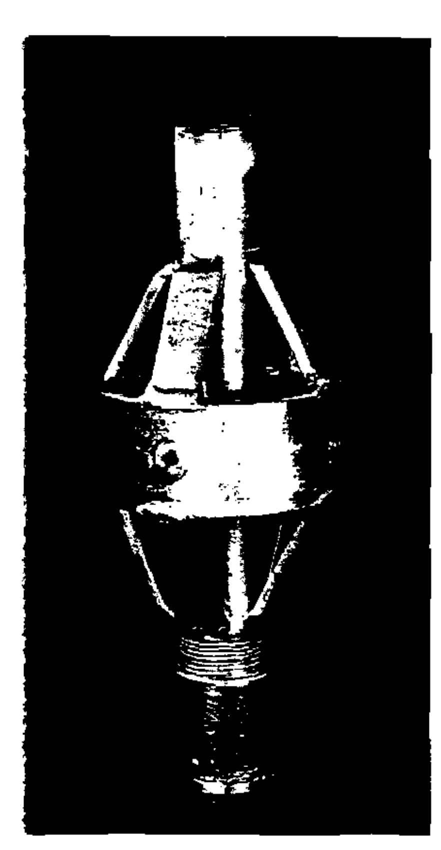


Fig. 288: Dispositivo para chorro de agua, de 4 boquillas y diseñado para usarse dentro de una rejilla Johnson de 20 cm. de diámetro.

rectos perforados en un tapón o en una unión de tubería demuestran ser aceptables por lo general.

El diámetro de la tubería deberá ser lo suficientemente grande, para mantener las pérdidas de carga por fricción. dentro de un nivel razonable. Los diámetros que más se usan son: 38 mm. en tubería estándar, para cuadales de hasta 190 l. por minuto, y en profundidades de hasta 30 m. ó 132 l./min. a 60 m.; tubos de 50 mm. para caudales de hasta 380 l./min. en profundidades de hasta 30 m., ó 280 l./min. en profundidades de hasta 60 m.; y tubos de 76 mm., para caudales de bombeo de hasta 1,140 l./min. en profundidades que alcancen hasta 30 m., ó 760 l./min. a 60 m. El empleo de estos diámetros mantendrá las pérdidas por fricción dentro de límites aceptables.

La menor velocidad a la cual un dispositivo de chorro puede considerarse efectivo es de unos 30 m. por segundo. Se obtienen mejores resultados cuando la presión se aumenta hasta producir velocidades de 45 a 90 m. por segundo. Puede que las velocidades muy altas no produzcan un beneficio adicional sufieiente como para justificar el costo extra que implica el obtenerlas. Las velocidades que se obtienen al utilizar presiones mayores que unos 35 Kg./cm². pueden causar cierta abrasión, particularmente en las rejillas de latón.

La Tabla XXXI, suministra los datos para boquillas y eyectores de diferentes tamaños a distintas presiones de operación.

Experimento sobre Desarrollo

Los ensayos realizados en un pozo experimental perforado cerca de Cloquet, Minn. han demostrado los efectos ventajosos del desarrollo de un pozo. El pozo fue perforado por el método de percusión y se completó con una rejilla Johnson No. 40, de 3 m. de longitud.

El pozo fue primeramente bombeado a un caudal de 416 l. por minuto antes de emprender ningún trabajo de desarrollo. El abatimiento fue de 0.78 m. y la capacidad específica, de 53.3 l/min. por decímetro de abatimiento. Luego, se bombeó el pozo y se reeirculó el agua ligeramente, después de lo cual se bombeó de nuevo a 416 l/min. Este ligero desarrollo hizo disminuir el abatimiento a 0.47 m. y aumentó la capacidad específica hasta 90.3 l/min. por decímetro de abatimiento.

Seguidamente, se introdujo en el pozo lodo de perforación consistente en 22.7 kilogramos de bentonita mezclada con agua, con la intención deliberada de obstruir la formación en los alrededores de la rejilla. Después de dejarlo reposar toda la noche

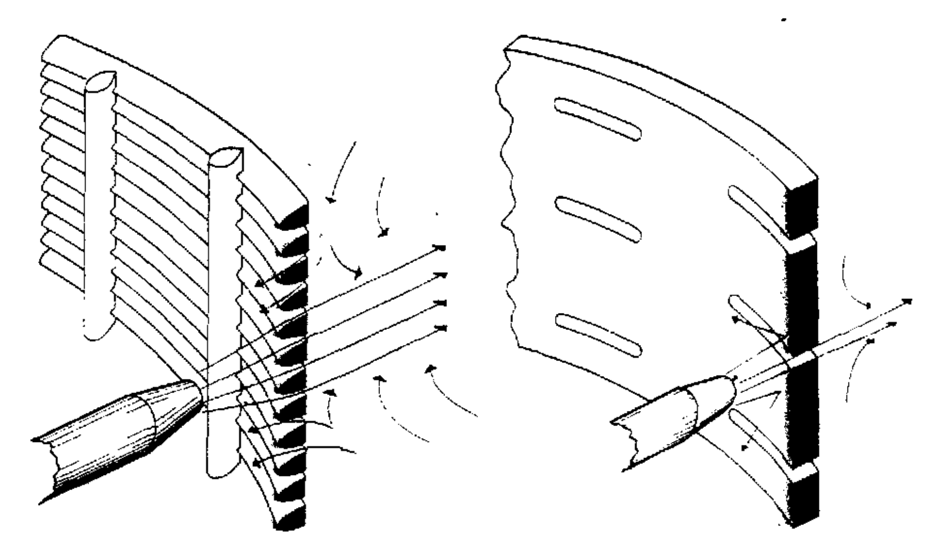


Fig. 289: Los chorros de agua de alta velocidad actuan con efectividad a través de las aberturas en las rejillas de ranura continua, pero son menos útiles cuando se emplea tubería perforada en cuyo caso las aberturas representan solamente un porcentaje pequeño del área total.

lleno de lodo, se bombeó el pozo al día siguiente, hasta que el agua que se estaba extrayendo se hallara completamente clara y libre de toda turbiedad. La descarga fue de 312 litros por minuto con 5 m. de abatimiento. lo que demostró que el lodo había reducido la capacidad específica hasta 6.2 l/min. por decímetro de abatimiento.

Después de realizar este experimento, se desarrolló el pozo por medio del proeedimiento de chorro de agua horizontal a alta velocidad. Después de una hora de desarrollo, se probó de nuevo el pozo. El rendimiento aumentó a 500 l/min. con un abatimiento de sólo 0.40 m. lo que corresponde a una capacidad específica de 125 l/min. por decímetro de abatimiento.

Agentes Dispersores

La adición de una pequeña cantidad. de cualquiera de los diversos polifosfatos, al agua que se hace circular para desplazar el

Tabla XXXI
Velocidad del Chorro y Descarga por Boquilla

Diámetro	Presiones en Kilogramos por Centímetro Cuadrado							
del orificio de la boquilla mm.	Veloc. m/s	Descar-ga l/min	Veloc. m/s	Descar-ga l/min	Veloc. m/s	Descar-ga l/min	Veloc. m/s	Descar-ga l/min
4,76	36	34	45	45	51	49	57	57
6,35	36	60	45	80	51	87	57	98
9,53	36	136	45	174	51	200	57	223
12,7	36	250	45	310	51	352	57	393

NOTA: El coeficiente de descarga en la boquilla, se admite ser de 0.9

fluído de perforación, a la que se usa para el retrolavado e inyección del chorro y al agua que reposa dentro del pozo, contribuye considerablemente a la eliminación del lodo. Estos polifosfatos dispersan las partículas de arcilla contenidas en el lodo de perforación y rompen su aglutinamiento.

Su acción dispersora contrarresta la tendencia del lodo a adherirse a los granos de arena. Al rompérsele su aglutinamiento, el lodo se elimina más fácilmente por medio de agitación y retrolavado. Los polifosfatos que con más efectividad contribuyen a la remoción del lodo son los siguientes: tetrapirofosfato de sodio, el tripolifosfato de sodio, el hexametafosfato de sodio y el heptafosfato de sodio. Debe utilizarse una dosificación de alrededor de 6 kg. por m^3 de agua. Una cantidad mayor de fosfato no produce resultados muy diferentes, cuando se emplea en la dispersión del lodo.

Desarrollo de Pozos en Arena Fina

La comparación de dos pozos perforados en Libia, por la Oasis Oil Company de la localidad, muestra lo que es capaz de lograr un desarrollo adecuado de un pozo, aun en condiciones adversas. Uno de los pozos fue construído para ser desarrollado por vía natural, y acondicionado con una rejilla Johnson de 20 cm. de diámetro, dentro de un agujero de diámetro ligeramente mayor. El otro pozo se construyó con un filtro artificial de grava y se dotó de una rejilla del tipo de celosía. La grava se colocó alrededor de la rejilla y por dentro de un agujero, ampliado en su intervalo inferior, de 0.90 m. de diámetro.

Ambos pozos interceptan el mismo acuífero constituído por arena relativamente fina y ligeramente cementada. El acuífero es de un espesor un poco mayor de 30 m. Las características del acuífero son las mismas en ambos sitios. La rejilla del pozo desarrollado por vía natural tiene una longitud de 32 m., que incluye 18.3 m. con aberturas de 0.25 mm., y 13.7 m. con aberturas de 0.5 mm.

La Fig. 290 muestra los detalles del diseño y la construcción del pozo desarrollado por vía natural. La Fig. 291, los del pozo acondicionado con filtro artificial de grava. La rejilla del tipo de celosía en el pozo con filtro de grava tiene una longitud de 38.1 m. y sus aberturas son de 1.38 mm.

Para desarrollar el primero de los pozos por vía natrual, se usó el método de chorro de agua horizontal. Se necesitaron alrededor de 5 días para llevar a cabo el trabajo de remoción del fluído de perforación y de la arena muy fina de la formación, así como para estabilizar ésta en torno a la rejilla. Una vez completado, el pozo fue bombeado a una descarga de 2,840 l. por minuto, hallándose el agua completamente libre de arena.

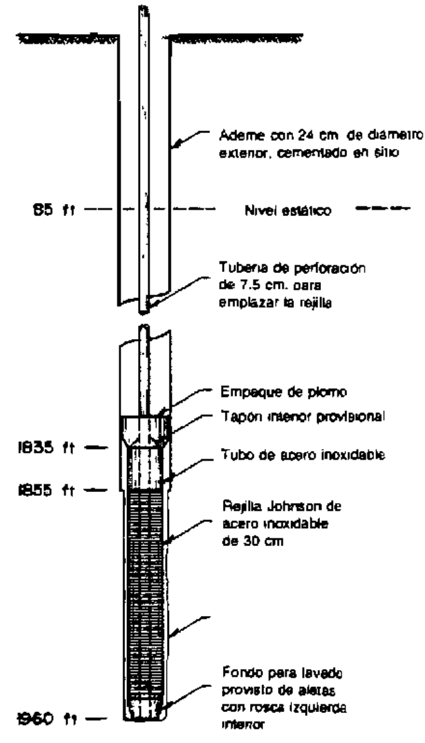


Fig. 290: Pozo desarrollado por vía natural en Libia, que produce agua salada para un campo petrolero. Bombeado a 170 m.^{3}/h., produjo agua libre de arena y su capacidad específica fue de 13 m^3/h., por metro de abatimiento.

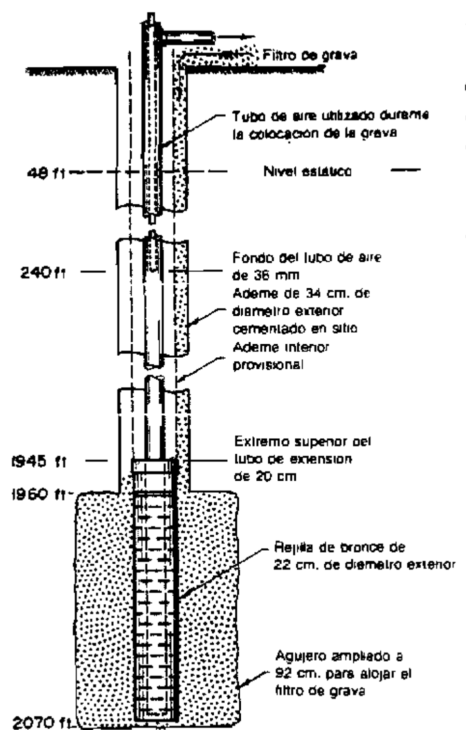


Fig. 291: Pozo acondicionado con filtro artificial de grava, en Libia, con rejilla del tipo de celosía y que produjo una capacidad específica de 0.98 m^3/h. por m. de abatimiento.

Se encontró mucha dificultad en lograr que el pozo acondicionado con filtro artificial de grava llegara a descargar agua libre de arena. Se duró casi 30 días en agitar el agua y retrolavar el pozo. Es muy probable, que la mayor parte de las dificultades provinieran de haber rimado o ampliado el pozo en su intervalo inferior, más de lo conveniente.

Una vez concluído el trabajo, se obtuvo una capacidad específica para el pozo desarrollado por vía natural, de 21.6 l/min. por dm. de abatimiento, en comparación con una de sólo 1.6 l/min. por dm. de abatimiento, en el otro pozo.

Los datos suministrados por la prueba mostraron que la transmisividad de la formación acuífera en el sitio correspondiente al pozo desarrollado naturalmente era ligeramente mayor que la del sitio de emplazamiento del otro pozo. Sin embargo, hechas las correcciones por el efecto de esta diferencia, resulta aún evidente que el desarrollo de la formación finamente gradada tuvo un gran éxito.

El desarrollo de un pozo acondicionado con filtro artificial de grava es igualmente importante que el que se debe realizar en cualquier otro tipo de pozo.

Pozos con Filtro Artificial de Grava

Cuando se perfora un pozo para acomodar un filtro artificial de grava, se forma, como ya se ha descrito, una delgada película de material impermeable en la pared del agujero. Cuando la grava ha sido colocada en torno a la rejilla, esta película o capa de lodo queda aprisionada entre la grava y la cara de la formación natural. El objetivo principal del desarrollo es el de desprender y eliminar este material.

No importa cuál sea el procedimiento de perforación que se haya empleado, la delgada capa de material aprisionada en la cara exterior del filtro de grava debe ser eliminada. La presencia del filtro artificial de grava dificulta un poco la ejecución del trabajo.

El espesor del filtro de grava, y la gradación del material que se emplee, ejercen un efecto considerable sobre lo que puede lograr el desarrollo para llevar el pozo a su máxima eficiencia.

Las operaciones de agitación resultan menos efectivas que en aquellos pozos diseñados para ser desarrollados por vía natural. Una de las razones de ello es la de que un filtro de grava es tan permeable, que el agua tiene una mayor tendencia a desplazarse hacia arriba y hacia abajo a través de la envoltura de grava, que a moverse por aquéllas partes de la formación que pudieran hallarse parcialmente obstruídas. Cuanto más delgado el filtro de grava, más seguro estará el perforador de poder eliminar toda la arena fina indeseable,

el limo y la arcilla, al desarrollar el pozo. Los agentes dispersores a base de polifosfatos contribuyen con efectividad a la remoción del limo y de la arcilla.

Se necesita paciencia, observación inteligente y herramientas adecuadas, para completar correctamente un pozo acondicionado con rejilla, ya sea que éste se haya diseñado para desarrollarlo por vía natural, o que esté dotado de un filtro artificial de grava. El desarrollo de un pozo no resulta costoso, si se tienen en cuenta los resultados que se obtienen con ello. Casi cualquier pozo mejora su condición con un adecuado desarrollo.

Los Pozos en Roca Necesitan Desarrollo

Las operaciones que se realizan durante la perforación causan también cierta obstrucción de las fracturas y fisuras de las formaciones rocosas duras. La acción del barreno, corta y desmenuza la roca, mezclándola con agua y con otros materiales finos, hasta formar un lodo que es el que se extrae con la cuchara de achicar. El golpeteo del barreno desplaza este lodo dentro de las aberturas de la roca por fuera del agujero.

Cualquier material que obstruya las aberturas del acuífero rocoso deberá ser eliminado mediante el desarrollo. No se podrá alcanzar el pleno rendimiento de la formación si todas las fracturas y fisuras no se hallan en condiciones de ceder agua libremente al pozo. Algunas veces, el bombeo sólo puede atraer el residuo de lodo, puesto que las aberturas de una formación rocosa son grandes en comparación con los poros de una formación arenosa. Sin embargo, muchos perforadores han encontrado útil el uso de métodos de agitación u otras maneras de desarrollar los pozos emplazados en roca, para llevarlos a su máxima capacidad.

Explosivos Utilizados

Algunas veces se utilizan explosivos para hacer detonar los pozos, y tratar así de desarrollar una mayor capacidad en un pozo nuevo. Esta práctica ha demostrado tener buenos resultados en un regular porcentaje de casos. Debido a muchos factores desconocidos resulta, sin embargo, difícil predecir si la voladura va a producir resultados beneficiosos.

Por lo general se emplean cargas explosivas de 14 a 230 kg., dependiendo su tamaño de la dureza de la roca que se pretende volar y de la profundidad a la cual se detonará la carga. Puesto que la presión del agua aumenta con la profundidad, si ésta es mayor, deberán emplearse cargas más grandes para contrarrestar el efecto confinante de una mayor presión. Existe una considerable divergencia de opiniones en cuanto a la efectividad relativa de los diferentes tamaños de cargas explosivas. Algunos perforadores dicen que nunca deberán utilizarse cargas menores de unos 90 kg. en una sola denotación. Otros creen que una sucesión de explosiones más ligeras da como promedio un mejor resultado.

En los pozos que interceptan acuíferos constituídos por caliza, se puede usar ácido en el desarrollo. El ácido disuelve la caliza, y este efecto abre las fracturas y las fisuras de la formación en torno al agujero libre que, en este caso, viene a ser el intervalo de captación del pozo. Esto permite que las partículas finas que hayan quedado atrapadas en las aberturas de la roca se puedan eliminar fácilmente cuando se achica el agua o se bombea ésta del pozo.

Capítulo 15

Desinfección de Pozos y de Tubería

El paso final indispensable en la completación de un pozo consiste en una total desinfección del mismo y de todos sus elementos complementarios, para eliminar las bacterias que pudieran hallarse presentes.

Los materiales y herramientas que se utilizan en la perforación y desarrollo de un pozo de agua, se encuentran contaminados de suciedad y de ciertos tipos de bacterias. Durante la construcción de todo pozo, algunas de estas sustancias se introducen en el subsuelo.

Los gérmenes recogidos por las herramientas de perforación, tubería y otros materiales, son por lo general aquellos que habitan en el suelo del sitio en que se halla el pozo. Estos son principalmente del tipo no patógeno, y no producen enfermedades.

Sin embargo, entre ellos puede encontrarse el tipo de germen que se usa como índice de la posible presencia de bacterias patógenas. Si este germen, conocido como bacteria coliforme, se halla presente en el agua ello constituye una evidencia de que ésta ha sido contaminada por desechos animales o humanos. Significa también que el agua podría contener organismos patógenos o productores de enfermedades, que por lo general viven en el tracto intestinal del hombre o de los animales de sangre caliente.

El agua obtenida de un pozo sólo puede considerarse potable, cuando los ensayos demuestren que no contiene bacterias coliformes. Si éstas, recogidas del suelo durante la perforación, aparecen en una muestra de agua que se haya tomado de un pozo terminado, se puede considerar que el agua se halla contaminada por desechos fecales, aun cuando en el acuífero mismo, ésta sea de la más alta calidad sanitaria.

La bacteria coliforme puede tener también acceso al pozo, mientras se está instalando una bomba dentro de éste, conectando la bomba al sistema de distribución, e instalando los diversos elementos del sistema de tubería mismo. Asimismo, esto puede suceder cada vez que se abren tanto el pozo como el sistema de tubería, para efectuar reparaciones o labores de conservación, ya que la apertura de cualquier parte brinda la oportunidad para que se introduzca materia extraña dentro del pozo. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo una desinfección

inmediatamente después de haber construído el pozo.

El agente desinfectante más simple y más efectivo, para desinfectar o esterilizar un pozo, una bomba un tanque de almacenamiento o un sistema de tubería, lo constituye una solución de cloro. Con este propósito, se puede preparar una solución altamente clorada, disolviendo en agua, hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio o cloro gaseoso.

El hipoclorito de calcio es un material granular blanco, que contiene alrededor de 70 por ciento de cloro disponible, por peso. En años recientes, este material se ha lanzado al mercado en forma de tabletas, bajo los nombres registrados de Pit-Tabs, Tabletas de HTH y Chlor-Tabs*. Para distinguir este reactivo químico de la cal clorada o polvo blanqueador, corrientemente se le denomina hipoclorito de calcio de alto grado.

Cuando se disuelve en agua, un kilogramo de hipoclorito de calcio, con una concentración del 70 por ciento de cloro disponible, produce una solución que tiene un poder de oxidación de 0.70 kg. de cloro gaseoso disuelto en la misma cantidad de agua. Dicho de otra manera, 1.43 kg. de hipoclorito de calcio, son equivalentes a 1 kg. de cloro gaseoso disuelto en agua.

La concentración de una solución de cloro se expresa por lo general en partes por millón (ppm) o miligramos por litro, de cloro. Una solución de 10 ppm. representa una proporción de 10 gramos de cloro en 1.000 kilogramos de agua, o sea, un metro cúbico. Las soluciones cuyas concentraciones sean de 50 a 200 ppm de cloro, se emplean muy comúnmente en la esterilización de pozos y materiales para su construcción. La Tabla XXXII indica las cantidades de hipoclorito de calcio con 70 por ciento de cloro disponible, que se necesitan para formar un



Fig. 292: Haciendo circular una solución de cloro para desinfectar un pozo industrial que abastece de agua a una lechería en Minnesota.
(Cortesía de Mueller Bros.)

metro cúbico de solución esterilizadora de diversas concentraciones.

El hipoclorito de calcio seco es un material bastante estable. Pierde muy lentamente una parte de su cloro disponible. Cuando se empaca adecuadamente y se almacena a temperatura baja, está en capacidad de retener un 90 por ciento de su contenido de cloro, hasta por 12 meses después de fabricado. Si el reactivo se humedece, se vuelve muy corrosivo y pierde su cloro más rápidamente.

Hipoclorito de Sodio

El hipoclorito de sodio sólo se encuentra disponible en solución, ya que su composición química es muy inestable. Prácticamente todas las soluciones blanqueadoras para lavar consisten de hipoclorito disuelto en agua. Estas se preparan haciendo burbujear cloro gaseoso a través de una solución de soda cáustica. La solución pierde cloro a una velocidad tal, que una concentración al 10 por ciento, se reducirá a la mitad, después de 6 meses, aunque se haya almacenado en las mejores

*El Pittchlor está fabricado por la Columbia-Southern Chemical Corp.; HTH, producto elaborado por la Olin Mathieson Chemical Corp. y el Perchloron, hecho por la Pennsalt Chemicals Corp.

Tabla XXXII
Material Necesario para Formar 1 m³. de Solución de Cloro

Concentración de Cloro-ppm	Cloro-Gramos	Hipoclorito de Calcio Seco-Gramos
50	50	70
100	100	140
150	150	200
200	200	300
300	250	400
400	350	500

condiciones. Aquellas soluciones de más de 60 días, se considera que no contienen la cantidad total de cloro disponible que se hallaba presente en la solución original.

Las soluciones de hipoclorito de sodio las preparan en diversas concentraciones los diferentes productores de distintas localidades. La máxima concentración pareciera ser de un 20 por ciento de cloro disponible. Mucho más comunes son los blanqueadores para lavado doméstico los cuales contienen un 5 por ciento de cloro.

La Tabla XXXIII da las cantidades de blanqueador líquido que se necesita para formar 1 m³. de solución esterilizadora de varias concentraciones, y que se usa para la desinfección de pozos y de bombas.

Tabla XXXIII
Cantidades Necesarias de Blanqueador para Formar 1m³. de Solución Esterilizadora

Concentración de Cloro - ppm	Litros de Blanqueador, para las Siguientes Concentraciones		
	5%	7%	10%
50	1,0	0,71	0,5
100	2,0	1,43	1,0
150	3,0	2,14	1,5
200	4,0	2,86	2,0
300	6,0	4,28	3,0
400	8,0	5,72	4,0

Las soluciones desinfectantes se pueden preparar también haciendo burbujear cloro gaseoso por dentro del agua. El cloro se disuelve en el agua y forma una mezcla de ácidos hipoeloroso y clorhídrico. El pH del agua se reduce y esto provoca el efecto desinfectante de la solución. Excepto cuando se preparan grandes cantidades de solución esterilizadora, para desinfectar conductos de agua de gran tamaño, el uso del cloro gaseoso no resulta conveniente y se usan mucho más extensamente los hipocloritos en los casos que se describen aquí.

Para esterilizar pozos y sistemas de tubería deberá utilizarse una solución de alrededor de 100 ppm. de cloro disponible. Para lograr esta concentración de cloro en el pozo deberá introducirse en éste una solución más concentrada, para que después de haberse mezclado con el agua contenida en el pozo, se mantengan las 100 ppm de cloro.

Cloración Durante la Perforación

Debería practicarse como una cosa habitual el uso del cloro para desinfectar periódicamente el pozo durante la perforación. Cada dá se puede agregar al agua contenida en el pozo, una dosis razonable de cloro. Ello desinfectaría el ademe del pozo y las herramientas de perforación, conforme se va ejecutando el trabajo. Es también muy importante esterilizar todo el material de grava que se utilice en un filtro artificial de pozo, un poco antes de que el material sea colocado en su sitio.

Antes de la desinfección final de un pozo, tanque de almacenamiento o sistema de tubería, deberá limpiarse totalmente la estructura. Todas las sustancias extrañas, tales como sedimento, tierra, grasa, pastas usadas en uniones, y escoria, pueden llegar a alimentar y a proteger a las bacterias y por lo tanto deberán ser eliminadas.

Tanto el cloro como cualquier otra sustancia desinfectante, pueden destruir las bacterias únicamente si entran en contacto di-

recto con éstas. No es suficiente el simplemente vaciar dentro de un pozo una solución de cloro. Deberá agitarse el agua contenida en el pozo, para mezclar la solución a fondo. Además, las superficies de todos los componentes que se encuentren por encima del nivel del agua deberán a su vez lavarse con la misma solución esterilizadora.

Otro factor importante para lograr una eficaz desinfección, es el tiempo de contacto de la solución de cloro. El reactivo, una vez agitado en el pozo, deberá quedar dentro de éste por lo menos unas 4 horas y preferiblemente más tiempo.

En un pozo profundo cuyo nivel de agua se halle muy por encima, deben tomarse medidas para asegurarse de que la cloración alcance a toda la profundidad. Una disposición muy práctica consiste en colocar hipoclorito de calcio en un recipiente que puede hacerse de un tramo corto de tubo perforado y taponado en ambos extremos y acondicionado con un gancho en uno de éstos, para suspenderlo de un cable. Bajando y subiendo el recipiente por dentro de la columna de agua contenida en el pozo, se logra distribuir adecuadamente el reactivo.

El mismo dispositivo puede introducirse en un pozo surgente y moverse hacia arriba y hacia abajo en las proximidades del fondo. El flujo natural ascendente arrastrará el agua clorada hasta la superficie.

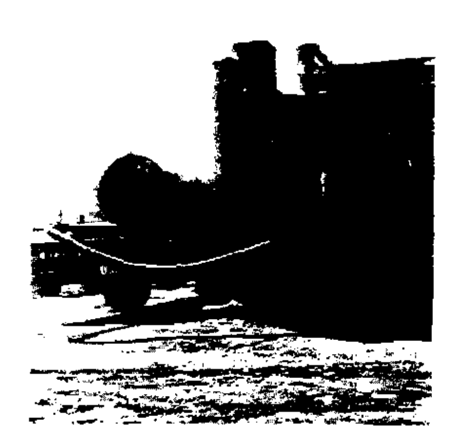


Fig. 293: Introduciendo una solución química contenida en un tanque, a un pozo municipal en Iowa. *(Cortesía de Vandenburgh Well Co.)*

Tanto después de la instalación original como inmediatamente de cualquier reparación, el sistema de bombeo, los tanques de almacenamiento y la tubería necesitan una desinfección similar a la de la estructura del pozo. Para lograr esto, se puede bombear del pozo la solución esterilizadora hasta el tanque y sistemas de tubería. Deberán tomarse medidas para estar seguro de que el agua clorada llegue hasta todos los tanques y tubería.

Los grifos, válvulas e hidrantes deberán abrirse hasta que el olor del cloro sea evidente. Luego, éstos deberán cerrarse y dejar la solución en reposo en los sistemas de distribución y almacenamiento por lo menos durante 2 horas o más. Si existe un tanque neumático, deberá tenerse cuidado de humedecer toda su superficie interior con la solución.

La efectividad de la desinfección deberá comprobarse después de concluir con el trabajo, verificando en muestras de agua la presencia de coliformes. Deberá entonces bombearse el pozo y lavar completamente la tubería, para eliminar cualquier traza de cloro antes de recoger muestras para análisis. Estas muestras deberán recogerse en un recipiente suministrado por el laboratorio, siguiendo las instrucciones pertinentes.

En el caso de que haya que reparar una bomba o un sistema de tubería, la contaminación de los tubos por la grasa, tierra, o partículas de polvo podría ocasionar que una prueba de laboratorio indicara la presencia de coliformes, aunque el agua del pozo fuera pura.

La experiencia que se tiene, con un pozo y sistema de agua privados en New Hope, Minnesota, demuestra que esto puede ocurrir. En Mayo de 1960, se tomó una muestra de agua de un grifo, en una casa suburbana construída 4 años atrás, que demostró la pre-

sencia de bacterias coliformes al analizarla en un laboratorio aprobado. Tanto el propietario como las autoridades de salud llegaron a la conclusión inmediata de que el agua subterránea del área se hallaba bastante contaminada.

El laboratorio que examinó la muestra de agua sugirió desinfectar el sistema de plomería antes de descartar la fuente de abastecimiento. Esto se logró mediante la cloración del sistema bajo la supervisión de un representante del laboratorio. Después de eliminar la solución de cloro mediante el lavado de la tubería, con agua bombeada directamente del pozo, el profesional de laboratorio tomó una nueva muestra de agua para ser analizada.

El análisis de esta muestra no reveló contaminación bacterial ni de otra clase. Como verificación adicional de la situación, se tomaron dos muestras más de agua de esta casa, las cuales fueron analizadas 3 meses después. Una muestra se tomó a la salida de la descarga de la bomba, en el sitio del pozo y la otra en un grifo de la cocina. Se encontró que ambas muestras se hallaban completamente libres de bacteria coliforme y también de cualquier otra contaminación. Por lo tanto, el agua del pozo era completamente segura; el problema radicaba en la presencia de tierra en la plomería de la casa.

La cloración del pozo y de sus elementos complementarios aseguran que éste y el equipo estén libres de los efectos de cualquier contaminación temporal que pudiera haberse introducido como consecuencia de la construcción o de trabajos de conservación. Todo lo que aquí se ha descrito, no podría evitar la contaminación de la fuente de agua. Sin embargo, por fortuna la mayor parte del agua subterránea contenida en los acuíferos de grava y arena es de una calidad sanitaria natural buena. La cloración durante y después de los trabajos de perforación o reparación de un pozo constituye una parte necesaria de la completación sanitaria del mismo.

Capitulo 16

Preservación del Rendimiento de los Pozos

La conservación periódica que se aplique, para resolver los problemas específicos de los pozos de cualquier localidad, puede mejorar su comportamiento y prolongar su vida útil. No es posible formular un solo sistema que se adapte a todas las condiciones geológicas, hidrológicas, de calidad del agua y de construcción del pozo. El estudio cuidadoso de los antecedentes de funcionamiento de diversos tipos de pozos de la región deberá, sin embargo, revelar los pasos lógicos que habrán de seguirse para establecer los procedimientos de preservación y rehabilitación que deban aplicarse.

Una cualquiera de diversas razones puede causar la disminución del rendimiento de un pozo conforme éste se usa. El desgaste de la bomba podría reducir la capacidad de ésta; un aumento de la carga dinámica puede también disminuir la descarga de la bomba. Un descenso general de la superficie freática podría reducir el rendimiento del pozo. La interferencia producida por el emplazamiento de nuevos pozos en los alrededores de uno existente podría causar un mayor abatimiento en el pozo afectado. Y, tal como se explicó en el Capítulo 6, las características hidrológicas de una región pueden ser tales, que el nivel de bombeo continúe descendiendo, si el pozo se bombea ininterrumpidamente.

Más corrientemente, la causa de la disminución de la capacidad de un pozo es la obstrucción de la formación acuífera en la proximidad del agujero y la oclusión de las aberturas de la rejilla. Este fenómeno se denomina incrustación. Se produce como resultado de la deposición o acumulación de materiales extraños en las aberturas o poros de la arena de la formación acuífera, y de la rejilla.

Algunas personas llaman equivocadamente corrosión a la incrustación. Sin embargo, la corrosión es una acción química que afecta a los metales, y que hace que un metal sea carcomido por el agua. Por otra parte, la incrustación se manifiesta cuando ciertos materiales inconvenientes se acumulan dentro y cerca de las aberturas de la rejilla o en los vacíos de la formación acuífera. En la mayoría de los casos, la incrustación es causada por otros factores diferentes a los que producen la corrosión.

Aunque la incrustación y la corrosión tienen en esencia efectos contrarios, en ciertas condiciones podrían manifestarse simultáneamente. Los productos derivados de la corrosión del hierro pueden causar incrustaciones. Por ejemplo, la construcción con dos metales, de las rejillas de núcleo tubular, induce la corrosión en el tubo perforado que sirve de base. El óxido de hierro o material de herrumbre que proviene de la corrosión del tubo de acero obstruye luego las aberturas de la envoltura de latón o de acero inoxidable.

La Calidad del Agua es la Clave

La calidad del agua tiene mucho que ver con la manifestación de la incrustación. La clase y cantidades de minerales y gases disueltos en las aguas naturales son las que determinan la tendencia de éstas a corroer los metales o a depositar parte de la materia mineral como incrustación. Las sustancias disueltas en el agua subterránea se hallan presentes en una condición de equilibrio bastante inestable. Cuando sucede algún hecho que altere este balance, algunos de los minerales dejan de estar en solución y son depositados como materia sólida. La costra que se forma en un recipiente de calentar agua, y en la cual se ha hervido un poco de ésta, constituye un ejemplo muy común de lo anterior.

Las investigaciones recientes han hecho posible contrarrestar el efecto de la corrosión, mediante el desarrollo de rejillas de pozo, que pueden construirse con cualquiera de diversos metales, específicamente resistentes al efecto corrosivo de un determinado tipo de agua. Sin embargo, los hallazgos hechos con estas investigaciones en metales, no se pueden aplicar de la misma manera, en la prevención de la incrustación. Con la deposición de solamente una diminuta cantidad de los minerales presentes en el agua, se puede llegar a una seria obstrucción. Si una *ppm* de materia, se escapa cada día del agua de un pozo de 30 cm. de diámetro, del que se estén bombeando 1.900 l. por minuto, se formará



Fig. 294: La tubería ranurada de acero, utilizada en un pozo acondicionado con filtro artificial de grava, muestra una corrosión severa en algunas partes y una obstrucción casi completa en otras por incrustación de las aberturas.

un depósito de 2.8 kg. en 24 horas de operación. A esta velocidad, todos los vacíos de la arena, en un tanto de 15 cm. por fuera de la rejilla, se habrán rellenado completamente en 220 días.

Muy pocos propietarios de pozos u operadores de éstos niegan la importancia que tiene una adecuada preservación de los mismos. Pero en la práctica, la mayoría de las personas soslaya el problema. "Ojos que no ven, corazón que no siente" . . . pareciera ser la única explicación de la inadecuada conservación que se les da a los pozos de agua.

Por lo general, la bomba recibe atención, porque, al menos algunas de sus partes se pueden ver sobre el terreno. El pozo, en sí mismo, es ignorado, hasta que surge un problema que, cuando ya ha afectado seriamente el abastecimiento de agua a la bomba; demanda una inmediata y a veces, muy drástica intervención.

Dos obstáculos que se oponen a la conservación periódica de los pozos son de una naturaleza no técnica. El primero, que el propietario del pozo sabe que de tiempo en tiempo deben hacerse ciertas cosas para preservar la estructura del pozo en buenas condiciones, aunque ésta se encuentre enterrada y fuera de la vista, a cientos de metros por debajo de la superficie del terreno. La rejilla del pozo, que constituye el "toque final" de la construcción de un pozo que extrae agua de formaciones de grava y arena, debe tenerse presente. El grado de atención que debe dársele para mantenerla funcionando adecuadamente varía con la calidad del agua del acuífero. Cuando se bombea el pozo, el agua que fluye contínuamente a través de las aberturas de la rejilla y sobre las superficies metálicas de los elementos que la constituyen, puede llegar a obstruir sus aberturas o a corroer con el tiempo el material.

El segundo problema consiste en llevar un registro del funcionamiento del pozo. Puesto que no se puede ver lo que está sucediendo en el fondo del pozo, el propietario debe confiar en los registros de los caudales de bombeo, abatimiento, horas de funcionamiento, potencia empleada, análisis del agua y otros datos pertinentes, para establecer lo que pueda estar sucediendo.

Un registro apropiado es, en la mayoría de los casos, la base más digna de confianza para decidir qué procedimientos de conservación serían los más adecuados a la obtención de los mejores resultados

El análisis químico del agua debe de indicar el tipo de incrustación que podría manifestarse y la velocidad a que ésta se depositaría en la vecindad del pozo. Se pueden derivar ciertas conclusiones generales del análisis del agua, pero si sólo una muestra ocasional ha sido analizada, los resultados tienen poco valor para efectos de adoptar el tipo de acción que debe tomarse.

El análisis químico del agua podría revelar mucho más si las muestras fueran analizadas con regularidad y periodicidad. La calidad del agua puede cambiar

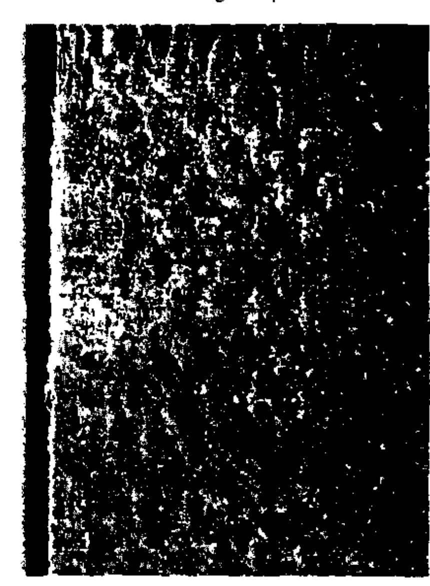


Fig. 295: Esta incrustación, que ha resultado de la deposición de carbonatos de calcio y magnesio, llegó a cerrar completamente las aberturas de este tubo perforado con ranuras del tipo de puente.



Fig. 296: Ejemplo típico de la obstrucción de las aberturas de una rejilla de pozo, por gelatinas de hierro y manganeso producidas por la actividad de la bacteria ferrosa.

lentamente conforme se utiliza el pozo. Esta calidad puede mejorar o empeorar: todo depende de las condiciones geológicas e hidrológicas del área.

Formas de Incrustación

La incrustación se presenta a menudo en la forma de una deposición dura, frágil, de apariencia de cemento, parecida a la costra que se forma en los conductos de agua. En condiciones diferentes, puede parecer un material gelatinoso, suave y pastoso como el lodo.

Enumeradas en su orden de frecuencia para manifestarse, las diferentes formas de incrustación incluyen las siguientes: *(1) incrustación provocada por la precipitación* de carbonatos de calcio y de magnesio, o de los sulfatos de éstos últimos; (2) incrustación debida a la precipitación de compuestos de hierro y de manganeso, principalmente sus hidróxidos y óxidos hidratados; (3) oclusión debida a la gelatina producida por la bacteria ferrosa y otros organismos productores de materia similar; (4) obstrucción resultante de la deposición de materiales tales como limo y arcilla, llevados en suspensión hasta la rejilla.

Causas de Incrustación

La incrustación de las rejillas de pozo se debe por lo general a la precipitación de carbonatos, principalmente de calcio, contenidos en el agua subterránea que se encuentra en la proximidad de la rejilla. Algunas otras sustancias, tales como los silicatos de aluminio y los compuestos de hierro, pueden también incorporarse a la costra de carbonatos que aglutina los granos de arena alrededor de la rejilla. Esta deposición llena los vacíos y el flujo de agua hacia el pozo se reduce proporcionalmente.

La explicación más plausible de este fenómeno es la siguiente: el carbonato de calcio puede ser arrastrado en suspensión en el agua subterránea en una proporción que depende del contenido de dióxido de carbono disuelto en ésta. La capacidad del agua para retener el dióxido de carbono en solución, varía de acuerdo con la presión, de forma que cuanto mayor la presión, más dióxido de carbono será retenido. Cuando se bombea agua de un pozo, la superficie freática se abate para provocar el gradiente necesario, o diferencia de presión, dentro de la formación acuífera, e inducir así el flujo de agua hacia el pozo. Por lo tanto, la presión hidrostática en las regiones más profundas del acuífero disminuye, haciéndolo en mayor magnitud en el punto del pozo mismo. Debido a esta reducción de presión, se libera una mayor o menor cantidad de dióxido de carbono. Cuando sucede esto, el agua pierde a menudo su aptitud para retener en solución su carga completa de carbonato de calcio, y una parte de este material gelatinoso se precipita a la arena adyacente a la rejilla del pozo.

La precipitación de los compuestos de hierro y de manganeso puede también ser causada por la liberación de dióxido de



Fig. 297: La costra de carbonato, cementa a menudo las partículas de arena y grava en torno a las punteras, obstruyendo completamente los poros de la arena y las aberturas de la rejilla.

carbono del agua subterránea. Es posible que también algunas otras alteraciones del régimen de flujo subterráneo, debidas a la puesta en funcionamiento de un pozo en un sitio particular, pudieran contribuir a la incrustación.

El Equilibrio de la Solución es Delicado

Debe aceptarse que el agua subterránea normalmente se desplaza muy lentamente a través del suelo, arena y grava. El agua permanece en contacto con estos materiales terrestres, por largo tiempo. Este tiempo se extiende lo suficiente como para que el agua, con su contenido de sales minerales, alcance un equilibrio con el medio que la rodea. El agua mantendrá en solución, la cantidad exacta de uno o más minerales que las condiciones le permitan. Cualquier alteración de éstas romperá el equilibrio del sistema y dará lugar a la precipitación de materias insolubles.

Así como un cambio de presión puede dar por resultado la precipitación del carbonato de calcio, también un cambio de velocidad podría ser suficiente para provocar la alteración necesaria para dar lugar a la formación de hidróxidos insolubles de hierro y manganeso. Estos hidróxidos son de constitución gelatiosa, por la que aún pequeñas cantidades ocupan volúmenes relativamente grandes. Cualquier oxidación que se manifeste dará lugar a la formación de óxidos hidratados de hierro y de manganeso.

Carácter de los Depósitos de Hierro

El óxido ferroso hidratado es una especie de lodo de color negro, en tanto que el óxido férrico tiene una coloración café rojizo, tal como la herrumbre común. El óxido de manganeso insolubie es a su vez una sustancia oscura de color café. Algunas veces, resulta difícil comprobar la existencia de materia extraña. Por ejemplo, las muestras de la formación arenosa adyacente a las rejillas de algunos pozos en una ciudad de Michigan, de una planta industrial en el norte de Indiana, y de otra, en el sur de Illinois, no revelaron la presencia de ningún material extraño en los vacíos de la arena, pero todas las partículas de ésta se hallaban recubiertas con óxido de hierro hidratado. Los pozos de donde se tomaron estas muestras habían sufrido una severa reducción de la capacidad específica a lo largo de un período de 3 a 4 años. Es muy posible que el hidróxido ferroso, que es un material de color blanco y apelusado, se hubiese introducido en los vacíos de la formación y que éste frágil precipitado se rompiese al tomar las muestras, sin dejar evidencia de su presencia.

En la parte desecada de la formación, dentro del cono de depresión que rodea al pozo que se está bombeando, el aire penetra a los vacíos y sin duda alguna oxida al hierro contenido en las películas de agua que se adhieren a los granos individuales de arena. Si el bombeo se inicia y se detiene, intermitentemente, se puede llegar a formar una capa de óxido de hierro, y el espacio correspondiente a los vacíos de esta parte de la formación, se reduce progresivamente. Esto produce el efecto de disminuir la capacidad de almacenamiento de la formación, en la región vecina al pozo, extendiéndose el cono de depresión con el tiempo, más rápidamente de lo que sería en otras condiciones.

La bacteria ferrosa vive en las aguas subterráneas que tienen un contenido apreciable de hierro. Se cree que este organismo se alimenta de compuestos de carbono, que incluyen los bicarbonatos y el dióxido de carbono. La producción de la gelatina es un resultado del ciclo vital de los organismos, y en particular, la bacteria ferrosa transforma el hierro a óxidos insolubles. La gelatina puede atrapar partículas de otras sales minerales insolubles, aumentando de este modo la obstrucción en torno a la rejilla del pozo.

La obstrucción de la rejilla, debida al arrastre de arcilla y limo en suspensión, no es cosa frecuente. Sucede más corrientemente cuando las aberturas de la rejilla son sumamente pequeñas y si el pozo ha sido inadecuandamente desarrollado, o también, cuando la formación contiene cantidades anormales de estos materiales finos.

Así pues, no se ha encontrado aún una manera de evitar enteramente la incrustación de las rejillas de pozo. Sin embargo, algo se puede hacer para retardarla y lograr que sus efectos sean menos severos.

Primeramente, la rejilla misma del pozo deberá tener una área de entrada que sea la máxima posible, para reducir a un mínimo la velocidad del flujo a través de las aberturas.



Fig. 298: Costras de óxidos de hierro resultantes de la corrosión de una rejilla del tipo de celosía, que cerraron completamente las aberturas de ésta, y cementaron los granos de arena en su cara exterior.

La longitud de la rejilla deberá ser adecuada, y el pozo haberse terminado mediante el empleo del método correcto para desarrollar la formación que rodea a la rejilla.

En segundo lugar, el caudal de bombeo puede reducirse en ciertas circunstancias, y aumentar el periodo de extracción. Esto tiene sus ventajas, al extremo de reducir el abatimiento.

Tercero, el volumen de extracción puede distribuirse entre un mayor número de pozos de menor tamaño, en lugar de tratar de obtener todo el abastecimiento mediante uno o unos pocos pozos de tamaño grande. Esto también produce el efecto de reducir el abatimiento.

Cuarto, debe aplicarse algún procedimiento de conservación o de limpieza a cada pozo, cuando la experiencia local demuestre que pueden presentarse problemas debido a incrustaciones. Las medidas correctivas no deberán abandonarse hasta tanto no se apliquen medios drásticos. Deberá llamarse a un perforador de

confianza cada ocho meses o una vez al año para que haga la limpieza del pozo. Esto debe hacerse con regularidad, aunque la producción del pozo no muestre disminución alguna. El adagio "es mejor prevenir que remediar" . . . . se aplica especialmente a todos los casos en que se sabe que pueden sobrevenir problemas debido a incrustación. El perforador sabrá qué mejor procedimiento utilizar.

En aquellos lugares en donde prevalece la incrustación de los pozos, es necesario analizar muestras de los materiales incrustantes. Estas muestras pueden a menudo obtenerse de las superficies exteriores de bombas, tuberías de aspiración, o rejillas que se hayan usado en pozos situados en la vecindad del sitio en que se está estudiando la situación. Los constituyentes incluirán, por lo general, carbonato de calcio, óxido de hierro, sílice, silicato de aluminio y materia orgánica. El material causante de la obstrucción no será



Figura 299: Apariencia característica de uno o varios tipos de bacteria ferrosa, que transforma el hierro disuelto en hierro insoluble y produce una gelatina que obstruye la formación en la vecindad del pozo de bombeo.

nunca una sola sustancia, sino que por el contrario, se deberá a una mezcla de varias cosas.

Las proporciones relativas de las diversas sustancias determinadas en el análisis químico, definirán el tipo de tratamiento que podría brindar el mayor éxito en la recuperación del rendimiento del pozo.

El ácido elimina el carbonato de calcio, pero no disuelve el sílice ni el silicato de aluminio. La presencia de óxido de hierro y de materia orgánica es una señal de eventuales problemas debidos a la bacteria ferrosa, y demanda el uso de cloro y de algún agente dispersor a base de polifosfato. Si no existe materia orgánica, el tratamiento con cloro será de poco valor.

Se Necesita una Conservación Periódica

Por lo general, la limpieza de los pozos se atiende con negligencia, hasta que surge un verdadero problema. El resultado de esta manera de proceder es el de que la limpieza que se necesita se pospone hasta que la capacidad ha disminuído considerablemente, o cuando el abatimiento se ha vuelto tan grande, que se rompe la aspiración de la bomba. Cuando la formación en torno al pozo y la rejilla misma se han obstruído a tal punto, el trabajo que se debe efectuar para llevar de nuevo el pozo a su capacidad adecuada, resulta mayor. Se necesita entonces un tratamiento químico intenso y un desarrollo del pozo.

A estas alturas, bien pudiera ser que una extensa zona de la formación alrededor del pozo se hallase parcial o totalmente obstruída. Por lo tanto, podría resultar extremadamente difícil y aún imposible, el difundir la solución química a todos los puntos en que éste pudiera disolver, o de otro modo eliminar, los inconvenientes depósitos.

Cuando se está tratando por vía química un pozo, nunca debe suponerse que la solución química puede desplazarse fácilmente hacia los vacíos de la formación

acuífera, uniformemente en todas direcciones y por dentro de todo el espesor del estrato productor. Las soluciones químicas fluirán más fácilmente a través de aquellas áreas en que la formación se halla más abierta, o sea, donde la resistencia al flujo es mínima.

La primera aplicación de solución limpia estas áreas y aumenta su permeabilidad. Como resultado de ello, la segunda dosis de reactivo es más susceptible de fluir a lo largo de las mismas trayectorias, a menos de que sea vigorosamente agitada y de alguna manera forzada, a que una parte de ella se desplace hacia zonas no habilitadas por la primera dosis.

Tratamiento con Acido

Por lo general, se emplea el ácido clorhídrico (muriático) que contenga un inhibidor apropiado, en los tratamientos de pozos, el cual disuelve fácilmente los carbonatos de calcio y de magnesio. El inhibidor sirve para aminorar la tendencia del ácido a atacar el ademe del pozo, evitando así daños serios a la tubería durante el tratamiento.

La incrustación del tipo de carbonatos se elimina eficazmente introduciendo ácido en el pozo, desplazándolo por las aberturas de la rejilla hacia los vacíos de la formación, y luego extrayendo por bombeo, cualquier materia extraña desprendida. Cualquier buen procedimiento resulta bien, pero deben emplearse técnicas adecuadas para lograr un efecto óptimo.

Los hidróxidos de hierro y de manganeso y sus óxidos son también muy solubles en ácido clorhídrico. Sin embargo, si el pH se halla por arriba de 3, éstos precipitan en la solución ácida. Para eliminar estos compuestos, deberá mantenerse entonces la concentración debida de ácido, hasta que éste se extraiga del pozo, por bombeo. Para ayudar a mantener el hierro en solución, deberá agregarse al ácido, un estabilizador. Para este propósito, se usan las sales de Rochelle.

Aunque las incrustaciones de hierro y de manganeso son solubles en ácido, algunas veces el tratamiento con éste no ha dado buenos resultados, cuando esas sustancias son la causa de la obstrucción. Algunas de las fallas se deben posiblemente a una técnica defectuosa de tratamiento, pero pareciera que es preferible el empleo de otro método de tratamiento con ácido en condiciones iguales.

El ácido muriático comercial se encuentra disponible en tres concentraciones en que lo preparan los fabricantes. Es preferible usar la concentración más alta, la cual se designa como de 27.92 por ciento de ácido puro. El ácido se vende en recipientes, ya sea de vidrio o de material plástico, con un contenido de unos 45 l. Si no se puede obtener ácido con inhibidor, se puede introducir un inhibidor de manufactura casera, que consiste en usar gelatina Knox. Se puede evitar cualquier daño serio del ademe, provocado por el ácido, agregando a 1,000 l. de ácido, unos 6.8 kg. de gelatina disuelta en agua tibia.



Fig. 300: Tratamiento con ácido de un pozo municipal en Palmer, Iowa, mediante el empleo de ácido clorhídrico (muriático), para lograr la restitución de su rendimiento original.

(Cortesía de DeVaull Well Co.)

Uso del Acido Muriático

El ácido debe usarse a plena concentración. En la mayor parte de los casos, la cantidad de ácido que se necesita para un solo tratamiento es de 1.5 a 2 veces el volumen de la columna de agua contenida en la rejilla. Esta dosis asegura que la rejilla quede llena, y que se suministra el ácido adicional para mantener la solución a la concentración correcta, conforme el reactivo reacciona con los materiales incrustantes.

La Fig. 301 ilustra un método para depositar el ácido en el pozo. Debe emplearse tubería de hierro negro o de material plástico, de 19 mm (¾ pulgada) o de 25.4 mm (1 pulgada) de diámetro y de suficiente longitud para alcanzar el fondo del pozo. La introducción del ácido en la tubería de alimentación se facilita con el uso de una te de plomería grande y de un embudo. No deberán emplearse tubería ni accesorios galvanizados.

Si la rejilla del pozo es de una longitud mayor que unos 1.2 o 1.5 m., resulta mejor vaciar suficiente ácido para llenar alrededor de 1.50 m. de la rejilla, haciendo subir luego la tubería de alimentación, unos 1.50 m., para agregar ácido nuevamente, y continuar de esta manera, hasta saturar toda la rejilla. El ácido es más denso que el agua, y desplazará a ésta, pero al mismo tiempo, se mezcla de inmediato con el agua, por lo que fácilmente se diluye.

Tan pronto como sea posible, deberá procederse a agitar el ácido de una u otra manera. El empleo de una máquina de perforar facilita la labor. La instalación y el retiro de la bomba, más el manipuleo de la tubería y de las herramientas utilizadas en el tratamiento, pueden hacerse más fácilmente con la máquina. Además, se necesita la cuchara de achicar, para extraer la solución gastada, los incrustantes que se hubiesen desprendido y la arena contenida en el pozo.

El ácido deberá agitarse dentro del pozo, por una o dos horas. Luego deberá achicarse. El achicamiento deberá continuarse hasta que el agua se halle relativamente clara. Mientras se maneja la cuchara, el perforador podrá cerciorarse de si el primer tratamiento ha mejorado el rendimiento del pozo.

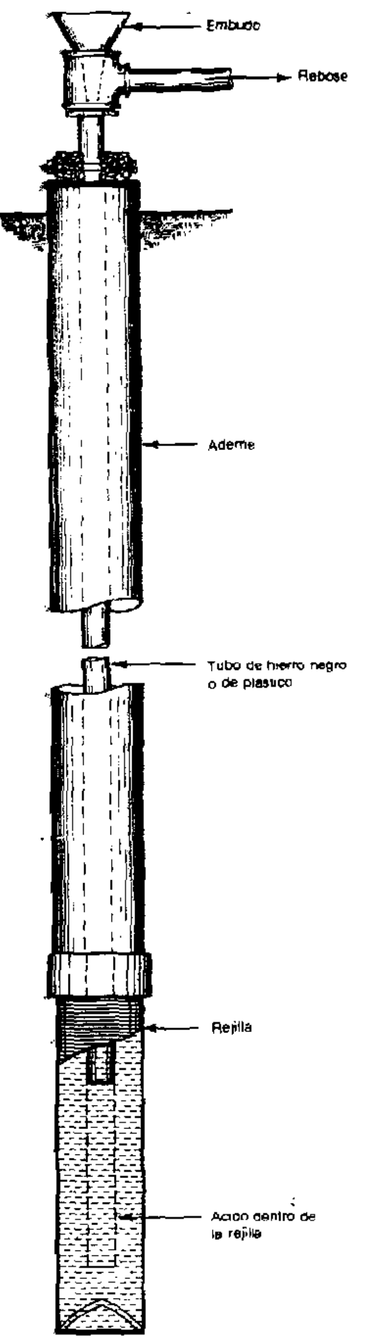


Fig. 301: Disposición típica para la introducción de ácido en la rejilla, evitando así la dilución del reactivo en el agua que reposa dentro del pozo.

El tratamiento deberá enseguida repetirse, usando la misma cantidad de ácido de alta concentracion. La agitación de la segunda dosis puede extenderse por tiempo mayor antes de proceder a achicar el pozo. Si se observa que es posible mejorar aún más la condición del pozo, puede aplicarse un tercer tratamiento.

Una variante del procedimiento, consiste en alternar el tratamiento con ácido, con la aplicación de cloro, repitiendo la combinación cuantas veces pareciera que se están obteniendo resultados beneficiosos. El ácido disuelve de inmediato los carbonatos de calcio y de magnesio, en tanto que el cloro elimina la gelatina depositada por la bacteria ferrosa.

Empleo del Acido Sulfámico

El ácido sulfámico, usado ampliamente en los últimos años para la limpieza con ácido de diversos tipos de equipo industrial, ofrece ciertas ventajas para el tratamiento de los pozos de agua. El ácido sulfámico es un material granular, seco, que se transforma en un ácido líquido fuerte cuando se disuelve en agua. La solución puede prepararse en el sitio de la obra. Esto constituye una verdadera ventaja, puesto que el transporte y el manipuleo del material, en un trabajo determinado, se facilitan. El ácido sulfámico puede prepararse a una concentración que produzca resultados comparables a los del ácido clorhídrico.

El ácido sulfámico no debe confundirse con el ácido sulfúrico, aunque sus nombres se parezcan. El ácido sulfúrico se usa sólo ocasionalmente en el tratamiento de pozos. Una de las razones para ello, es la de que reacciona con el carbonato de calcio formando sulfato de calcio, el que a su vez es muy poco soluble en agua.

La reacción del ácido sulfámico con los carbonatos de calcio y de magnesio, produce sulfamatos de calcio y de magnesio, los cuales son altamente solubles. Su actividad es un poco más lenta que la del ácido clorhídrico (muriático) especialmente a las temperaturas que de ordinario prevalecen en los pozos. Por lo tanto, se requiere un período de contacto algo mayor.

El ácido sulfámico ataca a los metales más lentamente de como lo hace el ácido sulfúrico. Su efecto corrosivo sobre el ademe del pozo y el equipo de bombeo, es marcadamente menor. El ácido sulfámico, a temperaturas ordinarias, ejerce muy poco o nada de efecto en las rejillas de pozo fabricadas con Everdur o acero inoxidable del tipo 304. Las rejillas de pozo hechas de estos materiales pueden sin peligro ser tratadas repetidas veces con ácido.

La Tabla XXXIV muestra la solubilidad del ácido sulfámico granular en agua, a diversas temperaturas y la concentración ácida de la solución que se obtiene. Nótese que a 16°C, el agua disuelve alrededor de 200 gramos de material granular por cada litro, o sea, cerca de un 20 por ciento por peso. Para el tratamiento ácido de los pozos de agua, la solución debe usarse a su máxima concentración. En la Fig. 302 se da el valor del pH de una solución de ácido sulfámico, hasta una concentración de 10 por ciento.

El ácido sulfámico puede introducirse de cualquiera de dos maneras, dentro del pozo que se va a tratar. El método usual consiste en mezclar con agua el material granular dentro de un tanque y vaciar o sifonear el ácido en forma líquida, en el pozo. Para colocar el ácido dentro de la rejilla, se puede utilizar tubería ya sea de hierro negro o de plástico.

En lugar de preparar la solución dentro de un tanque, se puede vaciar el mismo material granular dentro del pozo y mezclarlo con el agua contenida en éste. Agitando un poco el agua, se logra disolver completamente el ácido. La cantidad de ácido que en este caso

Tabla XXXIV
Solubilidad en Agua del Acido Sulfámico

Temperatura	5°C	10°C	16°C	24°C
Peso de ácido seco por cada 100 litros de agua	17 kg.	18 kg.	20 kg.	23 kg
Concentración ácida de la solución saturada	14 %	15 %	17 %	19 %

debe agregarse, se calculará con base en el volumen de agua que se encuentra dentro del pozo.

Agregando al ácido un agente humedecedor, se mejora la acción de limpieza hasta cierto punto. Este agente debe ser tal que el agua no lo disocie. Además, deberá ser de baja producción de espuma, y no iónico.*

El hecho de que solamente una cierta cantidad de ácido sulfámico se disolverá en el agua a una temperatura dada sugiere que debe introducirse en el pozo un exceso de material granular para mantener la solución a su concentración máxima. Conforme el ácido disuelto se va gastando en atacar los depósitos incrustantes, el agua irá tomando más material granular del exceso disponible.

El costo del ácido sulfámico es más alto que el del ácido clorhídrico inhibido (muriático) pero varias de sus ventajas contrarrestan esto. Los costos de transporte son menores. Su manipulación es más fácil, más económica y más segura. No hay peligro al vaciarlo. Ni el ácido sulfámico ni el agua de la solución de éste producen vapores, excepto al reaccionar con los materiales incrustantes.

El ácido sulfámico en forma granular no irrita la piel seca. Al diluirlo en agua, el ácido puede manejarse al igual que los otros ácidos fuertes. Deberán usarse gafas protectoras y guantes impermeables.

*Los agentes humedecedores tales como el Pluronic. F-68 (hojuelas blancas) o Pluronic. L-62 (Liquido) producidos por Wyandotte Chemical Co., son complementos muy eficientes de los desincrustantes ácidos.

La reacción de un ácido de tipo cualquiera, en un pozo, produce un volumen considerable de dióxido de carbono y, generalmente, algo de hidrógeno. El hidrógeno sulfuroso, un gas hediondo y muy tóxico, se produce como resultado de la reacción entre el ácido y el sulfuro de hierro, si este último se halla presente. Deberá proveerse suficiente ventilación de las casas de bombas y de cualquier otro espacio cerrado.

Nunca deberá permitirse al personal permanecer dentro de un foso, o depresión del terreno alrededor del pozo, durante la aplicación del procedimiento, ya que el dióxido de carbono y el hidrógeno sulfuroso son más pesados que el aire y tenderán a depositarse en el foso o en cualquier área baja.

Una de las aplicaciones convenientes que tiene el tratamiento con ácido de una rejilla de pozo es la de aflojar ésta antes de extraerla de éste, si ello fuese necesario. Ocasionalmente, se desea retirar la rejilla para utilizarla de nuevo en otro sitio. El ademe del pozo podría hallarse en malas condiciones o cualquier otra circunstancia puede hacer necesario el retirar la rejilla. El tratamiento preliminar con ácido, disuelve las incrustaciones, y facilita mucho la extracción.

Tratamiento con Cloro

Los desarrollos bacteriales, y los depósitos viscosos acompañados por deposiciones de óxido de hierro, que algunas veces causan una seria obstrucción del intervalo de captación de un pozo, no pueden

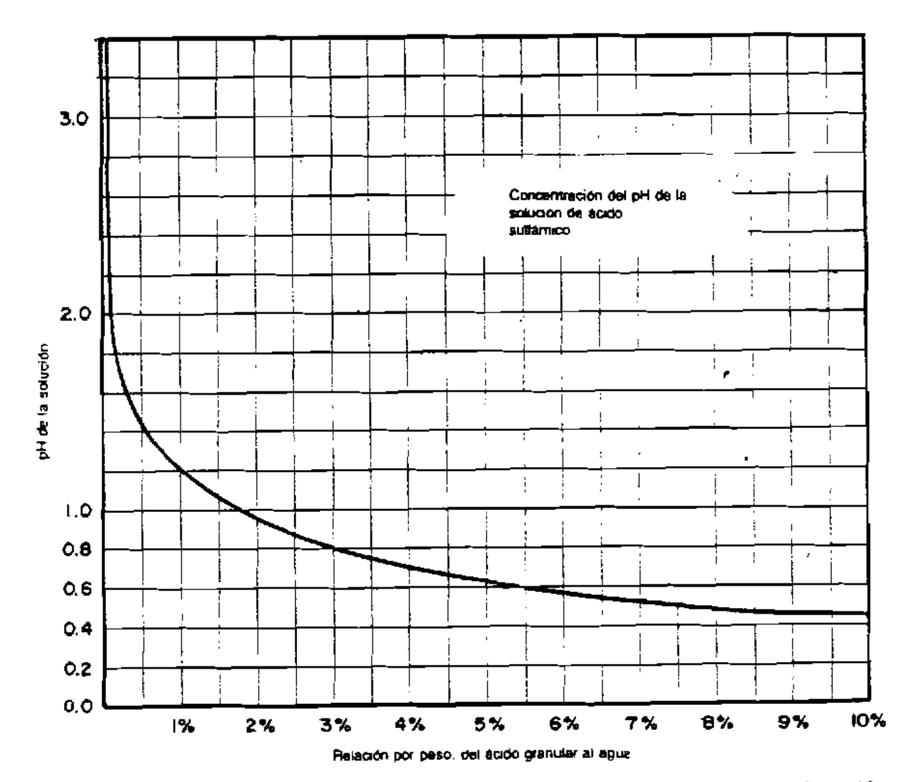


Fig. 302: Curva que muestra el pH del ácido sulfámico disuelto en agua en varias proporciones hasta 10 por ciento, por peso. *(Datos tomados de E. I. du Pont de Nemours y Co., Inc.)*

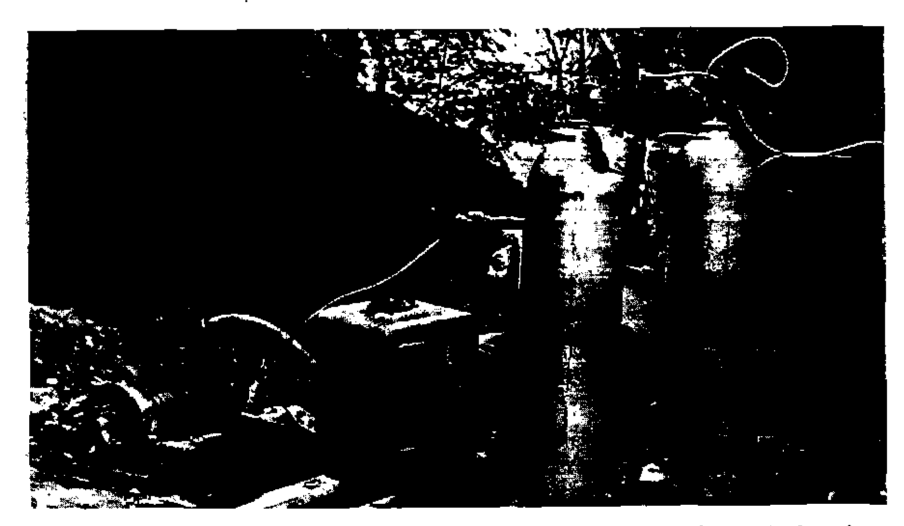


Fig. 303: Clorador portátil que se usa ventajosamente para medir y regular la dosificación de cloro al tratar los pozos con ácido para eliminar la bacteria ferrosa y oxidar la viscosidad. *(Cortesía de Fischer & Porter, Co.)*

eliminarse fácilmente mediante el tratamiento a base de ácido. El ácido probablemente mate a la bacteria, pero no permite una fácil eliminación de la viscosidad.

Se ha encontrado que el cloro es más eficaz para desprender este tipo de obstrucción. El cloro mata a la bacteria y al mismo tiempo produce un efecto de "combustión" de la viscosidad causante de la obstrucción, ya que el cloro es un fuerte agente oxidante.

Debe utilizarse suficiente cloro para lograr lo que apropiadamente podría definirse como un tratamiento súbito. Se necesitan concentraciones de cloro del orden de 100 a 200 ppm de cloro libre. Puede usarse también hipoclorito de calcio o de sodio. Cualquiera de los dos puede introducirse en el pozo, ya sea directamente, o en solución. El cloro gaseoso es más eficaz, pero el instrumental que se necesita para manejarlo y dosificarlo, no siempre está a la disposición. Además, debe colocarse en el pozo en solución acuosa, ya que el gas es muy corrosivo, como peligrosamente tóxico cuando se inhala.

La solución de cloro puede introducirse en el pozo a través de una tubería plástica de pequeño diámetro. Se sabe que para producir buenos resultados en un pozo grande, se requiere utilizar de 14 a 18 kg. de cloro, agregándolos lentamente durante un período de 10 a 12 horas. Los pozos menores necesitan menos cantidad del reactivo. No es necesario retirar la bomba, pero la tubería que conduce la solución de cloro hasta el pozo deberá colocarse en una posición tal que la solución concentrada de cloro no haga un contacto directo con ninguna parte de la bomba, del ademe o de la rejilla. Una vez que la solución se haya mezclado con el agua del pozo como para que la concentración se reduzca a menos de unas 500 ppm, el efecto corrosivo disminuye. Después de introducida, la solución de cloro debe obligarse a pasar a la formación



Fig. 304: Tratamiento con solución de cloro, de un pozo de una lechería en Minnesota, para eliminar la bacteria ferrosa y para desprender la sustancia bacterial gelatinosa que ha causado la disminución del rendimiento del pozo.
(Cortesía de Mueller Bros.)

acuífera, agregando un volumen considerable de agua. Para este propósito, deberá usarse de 50 a 100 veces el volumen de agua contenido en el pozo.

Cuando se usa el hipoclorito de calcio como fuente de cloro, la cantidad debe ser adecuada a la obtención de una concentración apropiada. El hipoclorito de calcio contiene alrededor de un 80 por ciento de cloro activo, cuando se disuelve en agua. Con unos 18 a 23 kilogramos, puede tratarse con eficacia un pozo de tamaño grande.

Si la bomba ha sido retirada del pozo durante la operación de limpieza, se deberá agitar la solución de cloro por cualquiera de los métodos que se han sugerido para el tratamiento con ácido. Si la bomba permanece dentro del pozo, podría ser posible agitar ocasionalmente éste durante el tratamiento, encendiendo el motor de la

bomba para levantar la columna de agua casi hasta la superficie y luego deteniendo el bombeo repentinamente para que el agua se precipite hacia abajo. Este método de agitación no es tan vigoroso como el que se podría aplicar si la bomba hubiese sido retirada, pero puede utilizarse cuando no resulta práctico extraer y reinstalar la bomba.

Deberán realizarse unas tres o cuatro aplicaciones sucesivas de cloro. Mediante tratamientos repetidos, se logra mayor oportunidad de que la solución química sea arrastrada a todas partes de la formación que rodea al pozo y que pudiera hallarse obstruida por la proliferación de la bacteria productora de viscosidades. Los tratamientos alternados de ácido y de cloro resultan altamente eficaces. El tratamiento con ácido deberá realizarse de primero, seguido de otro de cloro, después de que la mayor parte del ácido haya sido extraído por el bombeo. Luego, podría efectuarse un segundo tratamiento con ácido, seguido de otro a base de cloro.

Los fosfatos cristalinos (polifosfatos) resultan muy útiles en el tratamiento químico de los pozos, ya que dispersan con efectividad el hidróxido de hierro, el óxido de hierro, el hidróxido de manganeso, los

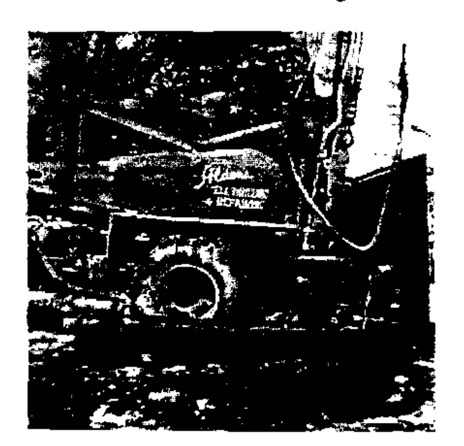


Fig. 305: Limpieza de un pozo de 15 cm. de diámetro mediante agitación y retrolavado simultáneos. La pequeña bomba de la izquierda hace recircular el agua dentro del pozo.

limos y las arcillas. El tratamiento con uno de los polifosfatos, complementado con una vigorosa agitación, es muy eficaz para eliminar esta clase de materiales. Una de las ventajas importantes del uso de los polifosfatos es la de que estos reactivos químicos son muy seguros de manejar.

Uso de los Polifosfatos Cristalinos

Los polifosfatos actúan en forma muy parecida a como varios detergentes domésticos realizan su acción limpiadora, excepto que las soluciones que se emplean en el tratamiento de pozos no producen efervescencia o espuma. La formación de espuma es inconveniente durante la limpieza de un pozo, porque interferiría con la agitación mecánica de la solución, dentro de aquél.

La solución de fosfato no disuelve la incrustación, tal como lo hace el ácido, por lo que no se manifiestan vapores o ebullición. La acción limpiadora de este reactivo es enteramente cosa de romper los materiales incrustantes y dispersarlos para que la bomba los extraiga del pozo. Esta breve descripción de la acción de estos reactivos, demuestra que cuando se usan polifosfatos, se debe agitar vigorosamente la solución, como parte esencial de las operaciones de limpieza.

Para cada 100 litros de agua, deberán utilizarse de 1.8 a 3.6 kg. de polifosfat. El fosfato deberá disolverse en un tanque o en barriles, e introducirse en el pozo en forma de solución. Al disolverlo, deberá suspenderse el fosfato cristalino dentro de un cesto de alambre o en una bolsa de arpillera, y no simplemente lanzarlo al tanque.

Cuando se usa el fosfato cristalino, deberá agregarse una pequeña cantidad de hipoclorito de calcio. Este reactivo sirve para clorar el pozo y elimina la bacteria ferrosa o cualquier otro organismo productor de viscosidades que se halle presente. Alrededor de 120 gramos de hipoclorito

deberán usarse para cada 100 l. de agua contenida en el pozo.

Algunos recomiendan que se utilice la bomba para agitar la solución de fosfato e hipoclorito. Se puede mejorar la efectividad del tratamiento retirando la bomba del pozo, y empleando métodos más convencionales de agitación. La agitación mediante un bloque de pistonco, un compresor de aire o el procedimiento de chorros horizontales de agua puede resultar mucho más eficaz. Estos métodos producen un movimiento más vigoroso y turbulento de la solución por entre las aberturas de la rejilla. Como resultado de ello, aumenta la oportunidad de romper y dispersar los materiales incrustantes.

Deberán realizarse dos o más tratamientos sucesivos. Como en el caso del tratamiento con cloro, la repetición brinda mayor oportunidad de que la solución química sea arrastrada a través de un mayor volumen de la formación que rodea al pozo. El tiempo

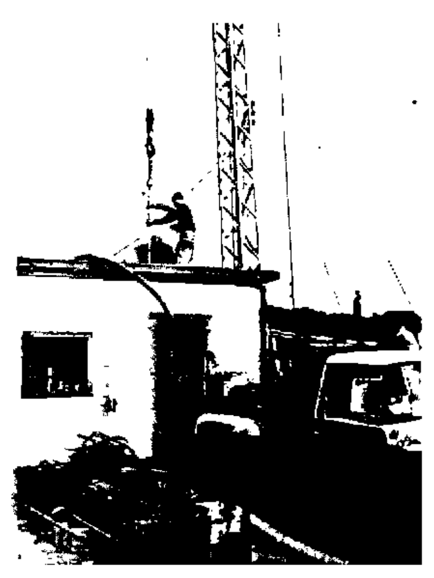


Fig. 306: Uso del procedimiento de chorros horizontales de agua a alta velocidad, para desprender una fuerte incrustación en un pozo municipal en Minnesota.

(Cortesía de Bergerson-Caswell, Inc.)

total durante el cual debe dejarse la solución dentro del pozo, es de alrededor de 24 horas.

Toda la anterior discusión referente a los diversos tratamientos químicos que se pueden emplear para eliminar las incrustaciones incluye sugerencias para agitar físicamente la solución dentro del pozo. La eficacia de cada uno de los procedimientos se aumenta grandemente con una vigorosa agitación.

Agitación Física

Los métodos para agitar las soluciones químicas que se agregan para la eliminación de materiales incrustantes son los mismos que se utilizan en el desarrollo de un pozo recién terminado. En el Capítulo 14 se ha descrito en detalle cada uno de estos procedimientos.

La agitación de la solución del reactivo químico puede lograrse mediante el empleo de un bloque de pistoneo, aire comprimido o chorros de agua de alta velocidad dirigidos horizontalmente. Una ligera agitación puede efectuarse con una bomba para pozo del tipo de turbina vertical.

Al aplicar estos métodos en el tratamiento de pozos, ello implica ciertos cambios pequeños en los detalles de operación. Por ejemplo, cuando se usa aire comprimido para agitar la solución química, el trabajo debe manejarse en tal forma que la solución no sea expulsada del pozo antes de que expire el período necesario de contacto. Si una gran cantidad de solución es extraída cada vez que el agua es puesta en suspensión por el aire, se desperdiciaría mucho material.

Cuando se agita mediante los chorros de alta velocidad, es conveniente bombear ligeramente el pozo al mismo tiempo. No siempre esto es posible, pero deberá hacerse cuando el diámetro del pozo, el equipo disponible y la elevación del nivel estático lo permitan. Con esta operación, el eyector introduce agua en el pozo a razón de 100 a 400 l. por minuto, dependiendo del diámetro

de las boquillas del eyector y de la presión de la bomba.

Si el caudal que se bombea del pozo es un poco mayor que el que descarga el dispositivo productor de los chorros, el nivel dinámico en el pozo se mantendrá por debajo del nivel estático y lentamente fluirá desde la formación al pozo.

Este desplazamiento del agua hacia el pozo a través de las aberturas de la rejilla, arrastra consigo cierta materia extraña que se desprende por la acción de los chorros. A su vez, el agua que se bombea del pozo, provee también un abastecimiento continuo que puede hacerse recircular y utilizarse para continuar con la operación a chorro. Cualquier cantidad de arena fina puede hacerse sedimentar en un tanque o en una fosa excavada, para evitar así el dañar la bomba o el eyector.

La recirculación mejora grandemente la eficacia del tratamiento con polifosfatos. Esta también es de desear, cuando se emplea el tratamiento con cloro.

La recirculación no resulta práctica, cuando se usa ácido, debido al efecto corrosivo del ácido en la bomba y al peligro de que el personal corra riesgos. Si el trabajo requiere la aplicación de chorros con ácido, es mejor llamar a una empresa de servicios de pozos, que disponga de equipo idóneo para esta clase de trabajo.

Una manera de mejorar la eficacia del tratamiento con ácido, cuando se emplea la técnica de los chorros de agua, consiste en vaciar primero el ácido dentro del pozo y luego aplicar los chorros de agua. No debe intentarse recircular la solución ácida. Una presión de 7 kg./cm^2 en la bomba, es suficiente para este tipo de operación.

El diseño de la rejilla influye considerablemente en los resultados que se pueden obtener con el procedimiento de los chorros horizontales de agua. La fuerza del chorro debe proyectarse a través de las aberturas de la rejilla. Una rejilla que contenga el mayor porcentaje de área abierta obviamente



Fig. 307: La prueba de bombeo realizada a continuación del tratamiento químico de un pozo en Argentina demuestra la recuperación del rendimiento original de éste.

(Cortesía de Shepard Hay y Cía., Ltd.)

producirá el efecto máximo en la arena que se halla en torno a ella.

Importancia del Diseño de la Rejilla

El tipo de rejilla de ranura contínua tiene las características que permiten la máxima eficiencia de operación cuando se limpia con el sistema de chorros de agua. Las rejillas de base o núcleo tubular ofrecen muy poca área abierta mediante las perforaciones de la tubería.

Las rejillas del tipo de celosía oponen al chorro una superficie metálica casi en su totalidad ciega. No puede esperarse que el empleo de los chorros de agua ofrezca buenos resultados en el caso de los pozos que se hayan acondicionado con este tipo de rejillas.

La forma de las aberturas de la rejilla, es otro factor de importancia que, con-

juntamente con el porcentaje de área abierta, incide directamente en la eficacia de la agitación por chorro. El mejor tipo de abertura es la ranura en forma de V, que se ensancha hacia el interior de la rejilla. Cuando se proyecta el chorro a través de estas aberturas en forma de V, tal como se muestra en la Fig. 289, el contorno preciso de la abertura de la ranura concentra el efecto de la vena de agua cual si fuese un segundo chorro. Otros tipos de aberturas de rejilla tienden a dispersar el chorro de agua, reduciendo su fuerza antes de que éste alcance a las incrustaciones de la arena por fuera de la cara exterior de la rejilla.

La Tabla XXXV muestra algunos de los resultados que se han obtenido mediante la aplicación de chorros de agua a la limpieza de pozos en dos localidades distintas. Alrededor de 8 de los 10 trabajos en que se ha empleado la técnica de los chorros de agua han demostrado buenos resultados.

Incrustación de Pozos Perforados en Roca

Aunque esta discusión se ha referido únicamente a pozos acondicionados con rejilla, los pozos que derivan su agua de acuíferos de roca consolidada también sufren el efecto de la incrustación. La ciudad de Lansing, Michigan, dispone de un número de pozos que han sido completados en acuíferos de caliza y que demuestran una disminución de su rendimiento conforme se usan. Estos pozos requieren tratamiento de tiempo en tiempo, a fin de recuperar su rendimiento.

El Departamento de Aguas de la Ciudad, ha probado con tratamientos químicos, pero las voladuras con nitroglicerina han

Tabla XXXV
Resultados de Experiencias de Campo en la Limpieza de Pozos Mediante Chorros de Agua

Localidad del pozo	Gibbon Minn.	Bemidji Minn.	Bemidji Minn.	Bemidji Minn.	Frazee Minn.[2]	Fremont Mich.	Hesperia Mich.
Año de la Perforación	1950	1950	1949	1949	1948	1931	1944
Año del tratamiento	1952	1955	1955	1955	1955	1952	1952
Capacidades específicas[1]:							
a. cuando nuevo	7.6	10.0	14.2	26.5	75.7	?	?
b. antes de limpiarse	1.1	5.1	6.3	3.0	3.8	3.8	2.3
c. después de limpiarse	12.1	10.1	15.5	24.5	12.9	5.6	7.6
Contenido de hierro del agua	7 ppm	—	3 ppm	3.5 ppm	1.6 ppm	—	—

[1]Capacidades específicas en m^3/hora por metro de abatimiento.
[2]Pozo con filtro de grava, tratado dos veces, antes de 1955, por otros métodos.

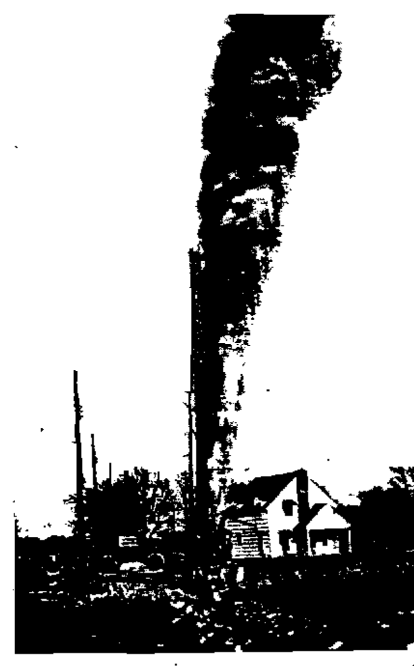


Fig. 308: Los explosivos se usan para desprender incrustaciones de pozos perforados en acuíferos de roca consolidada. Este pozo de 20 cm. de diámetro fue detonado con 45 Kg. de dinamita, para restituirle su rendimiento original.

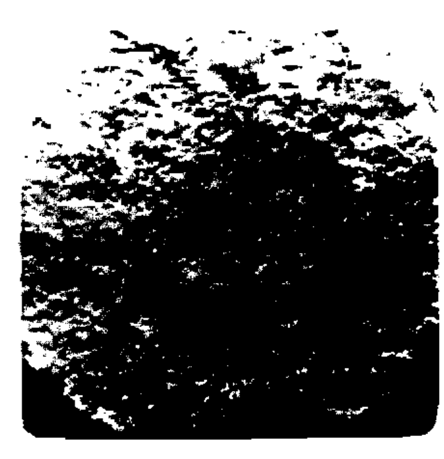
demostrado ser las más efectivas. Las muestras de arenisca recogidas después de las detonaciones, han indicado que la mayor parte de las incrustaciones se extienden únicamente hasta alrededor de uno 13 mm. por fuera de la pared del agujero.

Elección de la Rejilla

Debe hacerse énfasis en que la incrustación depende de los minerales contenidos en el agua subterránea y, hasta cierto punto, de la intensidad con que se bombee un pozo. El metal de que esté hecha la rejilla rara vez influye en la manifestación de incrustaciones. Sin embargo, en los lugares en donde la incrustación tiene lugar, es importante escoger un metal para la rejilla que sea susceptible de tratarse con ácido sin que se dañe con el tratamiento. Las rejillas fabricadas con aleaciones resistentes a la corrosión, tales como el metal Everdur, o el acero inoxidable tipo 304, y el bronce rojo al silicio, deberían usarse en todas las instalaciones, excepto en las provisionales.

Referencias

1. GROOM, C. H. AND BROWNING, J. T., *"Water Well Acidizing,"* Water Well Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 9-11, (1974), Urbana, Illinois
2. BROWN, E. D., *"Restoring Well Capacity with Chlorine,"* Journal American Water Works Associa-



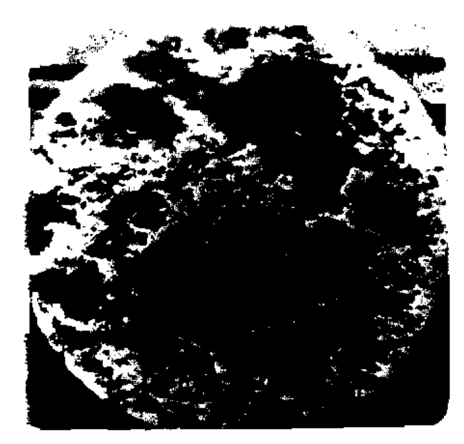


Fig. 309: La acidificación de un núcleo de caliza (izquierda) aumentó los pasajes internos hasta el tamaño que se muestra en la fotografía de la derecha. *(Cortesía de Dowell, Inc.)*

tion. Vol 34. No. 5. pp 698-702. (1942). New York.

3. HARDER, EDMUND C., "*Iron-Depositing Bacteria and Their Geologic Relations*," Prof. Paper 113, pp 85. (1919). U. S. Geological Survey, Washington

4. HEM, J. D. AND CROPPER, W. H., "*Survey of Ferrous-Ferric Chemical Equilibria and Redox Potentials*," Water Supply Paper 1459-A, pp 30, (1959), U. S. Geological Survey, Washington

5. "*Sulfamic Acid Information Bulletin*," E. I. du Pont de Nemours and Co., Inc., Wilmington, Delaware.

6. GALLINGER, CLYDE T., "*In-Place Acid Cleaning—Safe and Easy*," Plant Engineering, Bloomington, Illinois.

Capitulo 17

Corrosión de los Pozos de Agua

LA CORROSIÓN de las rejillas, del ademe y de los equipos de bombeo instalados en los pozos puede llegar a acortar en forma severa la vida útil de éstos. Un diseño adecuado del pozo debe tomar en cuenta la posibilidad de que éste pueda deteriorarse por el efecto de la corrosión. Por lo tanto, un criterio sano de diseño contribuye a obtener una estructura de duración adecuada, a un costo razonable.

La gravedad de una falla prematura del pozo debida a la corrosión puede apreciarse a través de los gastos que ello implique. Estos factores incluyen, no sólo los costos de la rehabilitación, o reposición de la estructura del pozo, sino también de los inconvenientes producidos por una interupción del abastecimiento de agua, durante el tiempo en que el pozo pudiese estar fuera de servicio.

Un sistema municipal de abastecimiento de agua podría dejar de percibir igresos, si se debe de restringir el consumo. Una planta industrial podría tener que disminuir su producción, si tuviese que reducir sus operaciones por falta de agua. Un regante puede llegar a perder parte del rendimineto de su cosecha, si no pudiera regar en el momento oportuno. Un ganadero tendría que acarrear el agua en vehículo para mantener vivos a sus animales.

En términos generales, la mayor parte de las aguas naturales son o corrosivas o incrustantes. La diferencia entre los efectos de corrosividad o incrustabilidad, de diversas aguas, es absolutamente un asunto que depende de su grado y naturaleza. Ambos efectos pueden sobrevenir simultáneamente, pero si a la corrosión se suma una erosión, ello tiende a evitar la acumulación de materiales incrustantes, en tanto que una capa de éstos tiende a proteger o a aislar la rejilla de la acción de la corrosión. Algunas aguas son sumamente corrosivas de la mayor parte de los metales que pudiesen sumergirse en ellas, otras tan solo corroen a unos pocos de éstos. Por ejemplo, algunas aguas corroen de inmediato al hierro, pero no afectan al bronce. No existe un metal o aleación, comercialmente utilizable en la fabricación de rejillas, que resista todos los tipos de corrosión, pero algunos ostentan un mayor rango de resistencia que otros. La investigación ha logrado eliminar gran parte del daño

producido por la corrosión. Las rejillas de pozo de tipo moderno pueden ahora fabricarse con metales que están especialmente adaptados para resistir la acción corrosiva de las diversas aguas.

La velocidad con que se manifiesta la corrosión depende de diversos factores tales como la acidez de las soluciones, la presencia o ausencia de agentes oxidantes, el desplazamiento de las soluciones sobre áreas que están siendo corroídas, el efecto electrolítico, la formación de películas o depósitos protectores y la temperatura de las reacciones corrosivas.

Para comprender la ventaja que representa el utilizar metales resistentes a la corrosión, y cómo éstos hacen que se economice dinero a largo plazo, se necesita hacer un repaso de las condiciones fundamentales en las cuales tiene lugar la corrosión.

Cuando se trata de problemas referentes a pozos de agua, algunas veces se confunden los términos corrosión e incrustación. Algunas personas utilizan el término corrosión para describir una situación en la que las aberturas de una rejilla o los pasajes de una bomba han llegado a obstruirse, dando como resultado, una disminución del rendimiento. Esto, en términos apropiados, corresponde a una incrustación, puesto que ha sido la consecuencia de la deposición de minerales y viscosidades acumulados en los poros de la formación acuífera y en las aberturas de la rejilla. Estas deposiciones son incrustantes. Su manifestación se ha descrito en detalle en el Capítulo 16, y ha sido referida como incrustación, no como corrosión.

Significado de la Corrosión

La corrosión se define como una actividad química sobre los materiales ejercida por agentes externos, lo que a su vez causa que el material sea carcomido o destruído. Por ejemplo, el ácido clorhídrico corroe una pieza de acero que se coloque dentro. El ácido es el factor externo que produce la actividad química en el acero, y que destruye gradualmente el metal. En este caso, la reacción química produce cloruro de hierro (cloruro férrico) que entra en la solución y libera hidrógeno gaseoso, que en forma de burbujas se escapa del ácido.

La mayor parte de las reacciones corrosivas son mucho más complejas que ésta, especialmente en aquéllas en que el agua dulce es uno de los agentes exteriores. A menudo resulta difícil predecir la velocidad de la corrosión, aún cuando se conozcan los caracteres del agua y del metal, ya que pueden estar involucradas otras variables aún no bien establecidas. Cuando ya se ha manifestado el daño causado por la corrosión la causa puede, por lo general, explicarse. El conocimiento de cómo tiene lugar la corrosión, revelado por las investigaciones acerca de los fundamentos de la misma, nos permite justificar un caso dado con más facilidad que predecir de antemano si la corrosión va a presentarse y en qué forma.

La experiencia y la teoría, unidas, permiten escoger lógicamente los metales que resistan a la corrosión, que duren más y que prueben ser más económicos en diversas situaciones. Esto es particularmente cierto en el caso de las rejillas para pozos de agua. La prolongada experiencia con diferentes metales y la observación de su desempeño bajo una gran variedad de condiciones constituye la base para la aplicación que hoy día se les da.

Formas del Ataque por Corrosión

A través de los años, se han observado y descrito ciertas formas bien definidas de ataque por corrosión sobre los metales. Sin embargo, las investigaciones cuidadosas han demostrado que todas las formas de corrosión provienen de una actividad electroquímica. Los ensayos también indican que uno de los factores esenciales es el que el agua se halle en contacto con el metal.

Las formas de corrosión, tal como éstas han sido identificadas, incluyen las siguientes, a saber:

- Aherrumbramiento general u otra pérdida uniforme de metal con perforaciones localizadas ocasionales.
- Pérdida de zinc o de otro elemento de alguna aleación, dejando un residuo debilitado.
- Corrosión bi-metálica, próxima al contacto entre dos metales diferentes.
- Picaduras intensamente localizadas, y perforación, con muy poca pérdida de metal en su derredor.
- Fracturación por debilitamiento corrosivo, producida en áreas de gran concentración de esfuerzos.
- Corrosión dentro de fisuras, enchufes, y por debajo de empaques o arandelas.

La primera forma de corrosión de la lista anterior es de apariencia uniforme, aunque implique la destrucción de la superficie del metal. Cuando una rejilla de pozo es corroída de este modo, la abertura de las ranuras puede llegar a ser varias veces más grande que el ancho original. Por lo general, esto da como resultado, que la arena o la grava entren juntos con el agua que está siendo bombeada. La resistencia de la rejilla se reduce en la misma proporción en que la acción corrosiva haya rebajado el espesor del metal.

La segunda forma de corrosión, o sea, la pérdida de zinc, se denomina algunas veces corrosión selectiva. El efecto que produce sobre una aleación de bronce, o sobre el latón, es el de separar el zinc de la aleación, dejando el cobre con apariencia porosa. Puede que la forma y las dimensiones de la porción afectada permanezcan igual a las de la pieza original, pero se reduce grandemente la resistencia del metal. Puede ocurrir una falla repentina, aunque parezca que el material se encuentra en buenas condiciones. Para obtener una aleación resistente a la pérdida de zinc, se disminuye el contenido de éste y se agrega una pequeña cantidad de algún elemento inhibidor.

La corrosión bi-metálica tiene lugar cuando dos metales diferentes se conectan

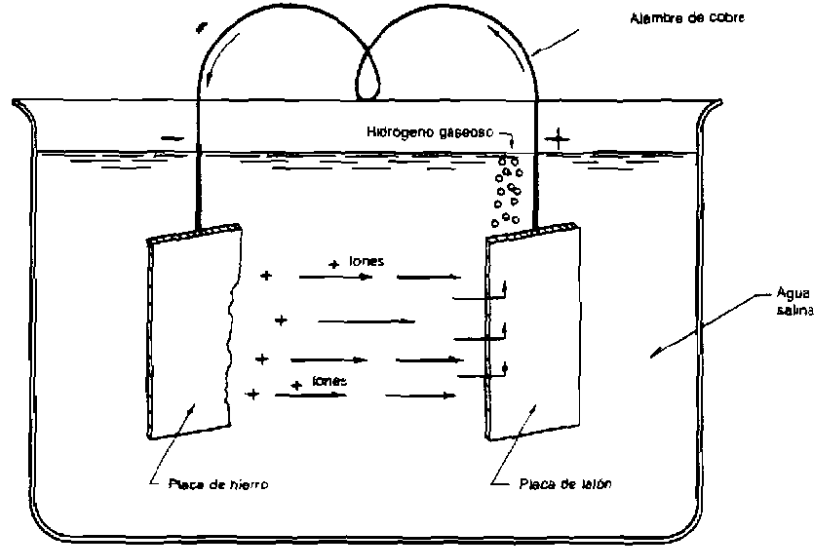


Fig. 310: Cuando dos metales diferentes sumergidos en un líquido conductor, o sea, un electrolito, se *conectan mediante un conductor metálico, se forma una celda galvánica. La actividad química causa el flujo* de una corriente corrosiva, que se manifiesta en el metal de donde sale la corriente.

entre sí y se sumergen en agua. Esta condición crea una celda galvánica. La corrosión se manifiesta, conforme prosigue la actividad de la celda. Una rejilla de pozo hecha de dos diferentes metales, tales como acero dulce y acero inoxidable, o acero dulce y Everdur*, se daña fácilmente como resultado de la corrosión galvánica del acero dulce.

El término actividad electroquímica, significa el cambio químico que acompaña al flujo de una corriente eléctrica. Esta acción se puede demostrar fácilmente sumergiendo piezas de dos metales diferentes en un recipiente con agua, y conectando los dos metales por el exterior del agua con un buen conductor eléctrico, tal como alambre de cobre. En estas condiciones, como lo indica la Fig. 310, la corriente eléctrica químicamente creada, fluye por el circuito cerrado que se ha establecido. Si se agrega un poco de sal al agua, se acelera la actividad.

Si uno de los metales fuese hierro y el otro bronce, la corriente automáticamente fluirá a través del agua salada, desde el hierro hacia el bronce, y enseguida, por el alambre de cobre, de regreso hacia el hierro. El hierro se corroe como resultado de esta actividad electrolítica. El ataque corrosivo produce herrumbre, parte de la cual se adhiere al hierro, y parte se desprende en escamas.

Otro cambio químico que tiene lugar al mismo tiempo, es el desprendimiento o liberación de algunos átomos de hidrógeno contenidos en el agua. Estos átomos se agrupan en la superficie de la placa de bronce, y producen hidrógeno gaseoso. Parte del hidrógeno queda adherido al bronce y el resto se escapa en forma de burbujas.

La Fig. 310 es equivalente a una batería sencilla. Si se conecta un voltímetro entre las dos placas en lugar del alambre de cobre, el instrumento registrará un voltaje o caída de potencial. El voltaje que se manifiesta en esas condiciones, es la fuerza motriz que causa el flujo de la corriente eléctrica. La velocidad de flujo de la corriente depende de la resistencia eléctrica del circuito. El agua ligeramente salada, como en el caso de nuestro ejemplo, es un buen conductor (tiene baja resistencia) por lo que la corriente fluye enseguida y la corrosión del hierro prosigue rápidamente. Si el agua no contiene sal, tanto la velocidad del flujo de la corriente como la de la corrosión, son más bajas.

Este experimento nos enseña de inmediato que la conductividad del agua en contacto con un metal es un factor importante de la velocidad de corrosión. Los minerales disueltos en el agua subterránea aumentan su conductividad eléctrica. Por consiguiente, hemos de esperar que, normalmente, la oportunidad de que la estructura del pozo sea dañada por la corrosión, será mayor cuando el agua subterránea arrastre grandes cantidades de minerales en solución. De hecho, éste es uno de los factores básicos implícitos en la corrosión de una rejilla de pozo.

Habiendo llegado a este punto, se necesita definir algunos términos técnicos relativos a nuestro ejemplo y al fenómeno de la corrosión. El agua o el fluído conductor se denomina *electrolito*, y corresponde al medio corrosivo, que puede ser cualquier cosa, desde la humedad del aire hasta el más fuerte ácido o álcali.

Un electrolito es cualquier líquido que contenga *iones*. Los iones son átomos cargados eléctricamente, o grupos de átomos en solución.

Las placas de nuestra pequeña batería corresponden al metal involucrado en la corrosión. El hierro se convierte en el polo negativo y se denomina *ánodo*. Es negativo, porque pierde átomos de metal positivamente cargados. Estos átomos entran al electrolito como iones positivamente cargados, en el punto en que la corriente eléctrica abandona al metal. El resultado de

*Marca Registrada. American Brass Co

ello es que el metal se carcome o se destruye. En cualquier celda de corrosión, es el ánodo el que sufre los efectos corrosivos.

Las cargas negativas depositadas en el ánodo viajan a través del alambre de cobre en dirección a la placa de bronce, la que a su vez se denomina *cátodo*. El cátodo constituye el polo positivo de nuestra batería. Para que pueda proseguir la actividad electrolítica, el cátodo deberá ser de una naturaleza tal que pueda recibir los electrones procedentes del ánodo. Los electrones no viajan a través del agua

Es importante observar que la actividad tanto del cátodo como del ánodo, puede realizarse por sí sola.

Como ya se ha explicado, la actividad electroquímica desplaza al hidrógeno del electrolito. Esto sucede así porque los iones de hidrógeno del agua positivamente cargados, se desplazan hacia el cátodo. En la superficie del cátodo se deposita una delgada película de hidrógeno. Si ésta permanece en la superficie del cátodo, la película de



Fig. 311: Rejilla de tipo de celosía, de hierro Armco, severamente dañada por la corrosión; la rejilla fue usada en un pozo acondicionado con filtro artificial de grava.

hidrógeno actúa como un aislante y tiende a detener el flujo de la corriente. Esto, a su vez, tiende a interrumpir la corrosión del ánodo. Tal acción recíproca, y sus efectos, se denominan *polarización* del cátodo.

Otra de las maneras de detener el flujo de la corriente sería la de cortar el alambre de cobre, aislando así las dos piezas de metal. Esto detendría la corrosión del hierro. La aplicación práctica de esta idea, a la prevención de la corrosión, se ilustrará luego.

La formación de la película de hidrógeno sobre el electrodo de carbón (el cátodo) de una batería seca constituye un ejemplo común de polarización. Conforme se desarrolla la polarización de la batería de una linterna, ésta se va obscureciendo cada vez más. Sin embargo, si se deja de usar la batería por un tiempo, la película de hidrógeno se desprenderá del electrodo de carbón, lo que explica por qué pareciera que la batería ha recuperado algo, cuando se la vuelve a usar.

Cuando la corrosión se manifiesta por el contacto de dos metales diferentes de una estructura tal como una rejilla bi-metálica de pozo, se conoce entonces como *acción galvánica*. La Fig. 310 ilustra una celda galvánica. La corriente que fluye como resultado de la diferencia de potencial entre los dos metales distintos recibe el nombre de corriente galvánica.

Diferentes áreas del mismo metal pueden también mostrar diferencias de potencial eléctrico, tal como lo hacen los dos metales diferentes del ejemplo recién descrito. Esto resulta de las variaciones de composición, acabado de la superficie o dureza del material de un punto a otro. Cuando la superficie del metal se humedece, se tienen los elementos de la celda galvánica.

Dos zonas de la superficie de un tubo de acero, podrían corresponder a dos metales diferentes; el agua constituye el electrolito y la pared del tubo equivale al alambre que viene a cerrar el circuito eléctrico. Cuando la

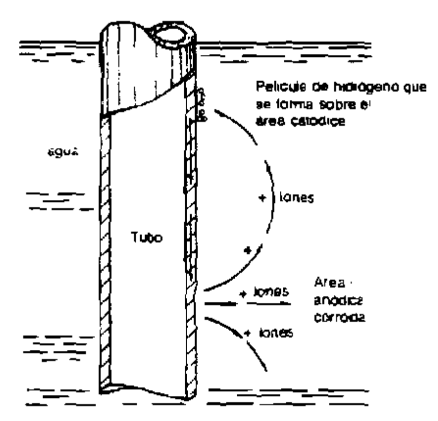


Fig. 312: El ánodo y el cátodo se pueden desarrollar en áreas muy próximas de una misma superficie metálica, dando por resultado una corrosión por acción localizada.

corriente abandona el tubo, o sea el área anódica, se corroe entonces el tubo. Cuando aquélla regresa a la tubería, esto es, al área catódica, se deposita una delgada película de hidrógeno en la superficie del tubo, que protege a esta área.

Cuando la corrosión se presenta porque existen diferencias de potencial de un punto a otro en una misma superficie metálica, ello se denomina *acción localizada*, y se muestra en la Fig. 312.

Obsérvese que tanto la acción localizada como la acción galvánica son ambas de naturaleza electrolítica. Se denominan mediante estos términos, únicamente para distinguir la corrosión bi-metálica, de la que tiene lugar en un mismo metal.

La Fig. 313 es un detalle a gran escala del área anódica de la superficie del tubo mostrado en la Fig. 312, e indica cómo se lleva a cabo la actividad química. Los iones de hierro de la superficie metálica abandonan a ésta y entran en solución con el agua. Estos se combinan con otros reactivos contenidos en ésta y con sus propios iones de hidróxilo (iones OH), para así formar hidróxido de hierro. Parte de éste es oxidado para formar óxido de hierro o herrumbre, por el oxígeno disuelto presente en el agua. Tanto el hidróxido como el óxido de hierro son insolubles en el agua. Estos se precipitan en la solución, conforme se van formando, y se depositan en la superficie del metal, en el área anódica o corroída.

La formación de hidróxido de hierro libera un átomo de hidrógeno (H), de cada molécula de agua que reacciona con el hierro positivamente cargado. Esta es parecida al ión de hierro escapado del metal, por lo que se desplaza hacia el cátodo bajo la influencia de la corriente eléctrica que fluye a través del electrolito. Como consecuencia de lo anterior, se produce hidrógeno, se polariza el cátodo y se libera hidrógeno en estado gaseoso.

Este proceso corrosivo va depositando hierro en forma de tubérculo ferruginosos alrededor de las picaduras. Estas continúan haciéndose más profundas, hasta perforar la pared del tubo. Sin embargo, algunas veces esta costra de herrumbre llega a cerrar el agujero, al extremo de que el flujo de iones y de la corriente, se detienen. En estas condiciones, la celda se vuelve inactiva mientras no se altere la costra. No obstante, puede producirse otra celda en un punto próximo, o comenzar a producirse otra acción localizada.

De una manera sencilla, esto explica por qué la velocidad de corrosión del hierro o del

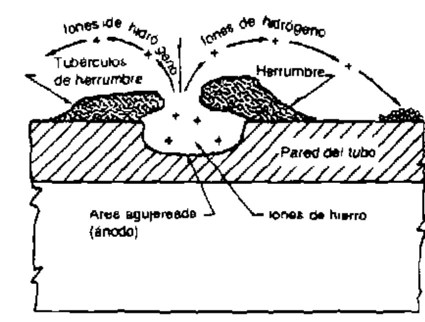


Fig. 313: La corrosión del hierro forma deposiciones de hidróxido de hierro y de herrumbre en las áreas anódicas. Las capas de herrumbre compactas llegan a sellar las picaduras y detienen el flujo de la corriente en estos puntos.

acero, en presencia del agua, pareciera disminuir conforme pasa el tiempo. La formación de una compacta capa de herrumbre disminuye el flujo de corriente en la celda localizada, y puede llegar, inclusive, a detener completamente la acción corrosiva. Como ya hemos visto, la polarización también puede contribuir a detener, al mismo tiempo, el efecto.

Las condiciones que evitan la firme adherencia de una película o costra de herrumbre, tales como la erosión por un flujo turbulento o por alguna combinación química que forme una capa porosa, permiten que la corrosión continúe sin interrupción. Tales diferencias debidas a pequeñas discrepancias de dos conjuntos de condiciones, contribuyen a que aparezcan como contradictorias, las manifestaciones de la corrosión metálica.

Cuando un tramo de tubería de un conducto subterráneo se sustituye por un nuevo tubo, la nueva pieza se corroe más rápidamente que la anterior. Algunas personas que han observado esto, comentan que la tubería moderna no es tan buena como la antigua, lo que no es cierto. La tubería de hoy día es realmente mejor, puesto que los procedimientos para la fabricación del acero son superiores.

Lo que causa la corrosión de la nueva tubería, es la celda galvánica que se desarrolla, al actuar como dos metales diferentes, el acero del nuevo tubo y la herrumbre depositado en la superficie de la tubería vieja. En la Fig. 315, los flujos de corriente aparecen indicados con flechas. El nuevo tubo empieza a corroer en el punto en donde la corriente abandona a éste, y el tubo antiguo se halla protegido contra un mayor daño, en el punto en donde la corriente llega. La protección del tubo viejo se realiza a expensas del tubo nuevo.

A menudo se desarrollan agujeros inconvenientes en las delgadas roscas que se hallan expuestas en cualquier acople roscado de tubería. Esto sucede porque la superficie de acero recientemente cortada en las roscas, se constituye en el ánodo de la celda galvánica. La superficie próxima, sin cortar, de la tubería, con su recubrimiento de fábrica, costras de fabricación y algo de herrumbre, ofrece una condición superficial muy diferente. La corriente fluye tal como se muestra en la Fig. 316. En tal caso, el área anódica resulta pequeña en comparación con

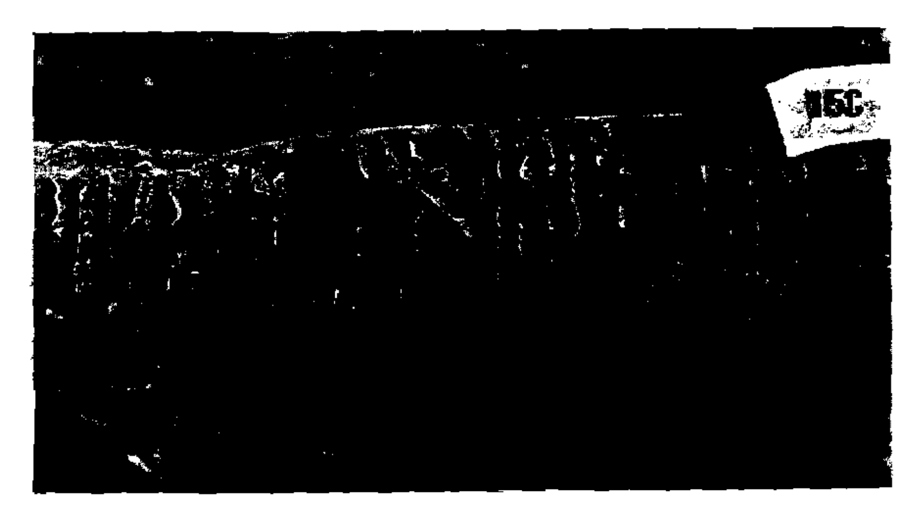


Fig. 314: Severa corrosión de un tubo ranurado de acero, después de dos años de servicio en un pozo de Fort Peck, en Montana. El agua es dura y contiene 4,000 ppm de sólidos disueltos totales.

el área catódica, condición que ayuda al desprendimiento de metal en el ánodo.

La galvanización de la tubería de acero deriva su ventaja del principio electroquímico para lograr la protección del acero, contra la corrosión, especialmente cuando el tubo se halla bajo agua. Para comprender cómo sucede esto, refirámosnos de nuevo a la celda galvánica.

Si las placas metálicas de la celda mostrada en la Fig. 310, fuesen de zinc y hierro, el primero sería el ánodo y es el que sufriría la corrosión. La corriente galvánica fluiría desde el zinc hacia el hierro a través del agua y el hierro se hallaría protegido, puesto que en este caso vendría a ser el cátodo. La capa de zinc que se utiliza para galvanizar el hierro o el acero, protege al metal de base de la corrosión bajo el agua, de dos maneras. Cuando la capa es contínua y sin fisuras, ésta evita el contacto-directo entre el agua (el electrolito) y el hierro. Cuando la capa se rompe y el hierro queda expuesto, se presenta la acción galvánica, tal como se muestra en la Fig. 318. El zinc es corroído y el hierro del área expuesta, en contacto con el agua, queda protegido, sacrificándose el zinc para evitar la corrosión del hierro. Cuando el zinc se aplica sobre una área extensa, sobrevendrá la corrosión del hierro por acción localizada.

El zinc próximo a un acople roscado dará protección contra la corrosión al acero descubierto que haya quedado expuesto al

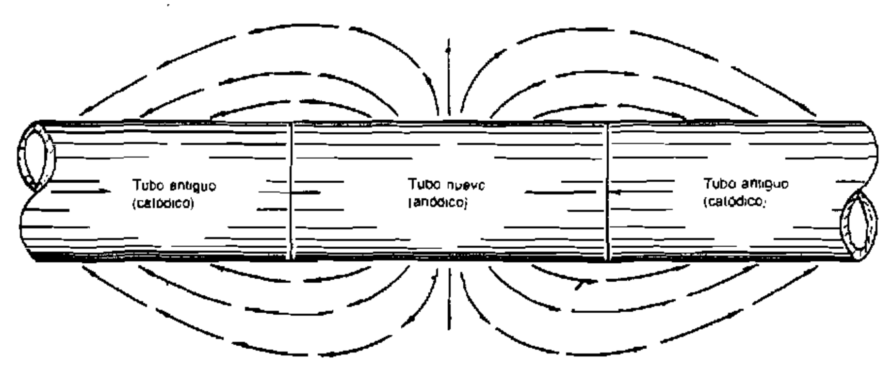


Fig. 315: Un tubo nuevo que venga a sustituir un tramo de tubería vieja, se vuelve a menudo anódico y se corroe más rápidamente que el tubo antiguo, el que se halla parcialmente protegido por una capa anterior de herrumbre.

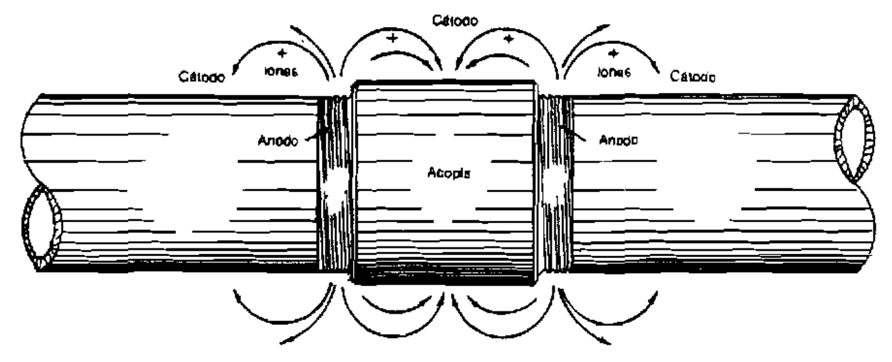


Fig. 316. La superficie de corte del acero, expuesta en las roscas de un acople de tubería, sufre la corrosion, porque a menudo es anódica en relación a la superficie recubierta de fábrica, de las áreas próximas.

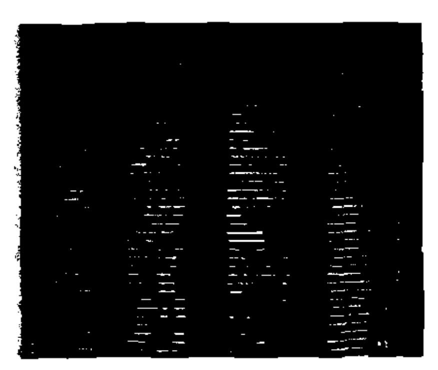


Fig. 317: Rejilla ranurada de latón, atacada por agua corrosiva que ha ampliado las aberturas en donde el metal ha sido corroído.

elaborar la rosca de la tubería galvanizada. De la misma manera, cualquier reventadura pequeña de la capa de zinc, en una rejilla de acero galvanizada, se halla protegida mediante acción galvánica, cuando está sumergida en agua, hasta que se consuma todo el zinc próximo a ella. Esta acción galvánica puede manifestarse en distancias de centímetros, pero no de metros.

Obsérvese que toda esta discusión se refiere al comportamiento de los materiales galvanizados que se hallan bajo agua. El papel que desempeñan las capas de zinc para proteger a los metales expuestos al aire o en un suelo saturado de características particulares es diferente, aunque la acción galvánica interviene parcialmente en estos casos.

Series Galvánicas

En el caso de las celdas galvánicas descritas, cabría el interrogante de por qué la corriente fluye del hierro al bronce, en un caso, y del zinc al hierro en el otro. Estos efectos son el resultado de las propiedades intrínsecas de los materiales. El hierro tiene una mayor tendencia a corroerse que el bronce, cuando se halla sumergido en un electrolito, y el zinc, por su parte, es más susceptible de corrosión que el hierro. En la serie galvánica tan conocida, los metales se enumeran en el orden de su tendencia a la corrosión. Cuanto más alta la posición del metal en la serie dicha, más activo es éste.

Cuando se acoplan dentro de un electrolito dos metales cualquiera, el metal más próximo al extremo superior de la serie galvánica se convierte en el ánodo y sufre corrosión. El que se halla cerca del extremo inferior permanence, por lo general, libre de ataque corrosivo.

El zinc se encuentra arriba del hierro en la serie galvánica, y el hierro por debajo del bronce. El zinc se convierte en el ánodo y es corroído cuando se acopla con hierro o bronce. El hierro se vuelve el ánodo y sufre el efecto de la corrosión, cuando se pone en contacto con bronce.

Cuanto más separada sea la posición de dos metales en la serie galvánica, mayor es el voltaje que se desarrolla en ésta. El voltaje, o potencial eléctrico entre el zinc y el bronce, es por lo tanto, mayor que entre el zinc y el hierro. Un mayor potencial eléctrico acelera la corrosión galvánica, de manera pues que el zinc se corroe mucho más rápido si se acopla con bronce que con hierro.

Cada metal comercial muestra diferente

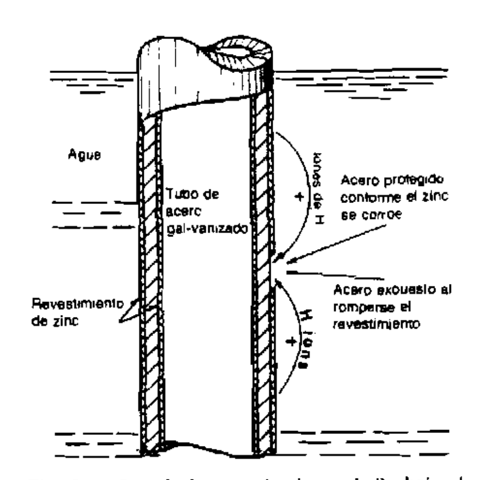


Fig. 318: Cuando la capa de zinc se halla bajo el agua esta es sacrificada para brindar protección galvánica al acero, aunque una parte de acero descubierto, pudiera hallarse expuesto en zonas en que la capa esté rota.

tendencia a combinarse químicamente con otras sustancias tales como el agua, u otros reactivos disueltos en ésta. Esta tendencia afecta no solamente la acción galvánica entre dos metales diferentes, sino que también la reacción corrosiva entre áreas localizadas del mismo metal.

El hierro es químicamente más activo que el bronce, por lo que la acción localizada corroerá más rápidamente una rejilla de hierro o de acero, que una de bronce sujeta a determinadas condiciones.

Tabla XXXVI
Serie Galvánica

Extremo Corroído	Magnesio
	Aleaciones de Magnesio
	Zinc
	Aluminio 2S
	Cadmio
	Aluminio 17 ST
	Acero, Hierro, Hierro Fundido
	Cromo-Hierro (Activo)
	Ni-Resist
	Acero Inoxidable, 18-8 (Activo)
	Plomo, Estaño, Soldaduras de Plomo-Estaño
	Níquel, Inconel (Activo)
	Latón, Cobre, Bronce, Monel
	Soldadura de Plata
	Níquel, Inconel (Pasivo)
	Cromo-hierro (Pasivo) Acero Inoxidable, 18-8 (Pasivo)
	Plata
Extremo Protegido	Oro, Platino

(De acuerdo con The International Nickel Co., Inc., New York)

Para asegurar una duración prolongada a las rejillas de pozos, deberán emplearse en su fabricación aquellos metales que tengan una menor tendencia a la corrosión, ya que la rejilla constituye un elemento importante de la estructura del pozo. El metal Everdur, el acero inoxidable 18-8 y el bronce rojo al silicio se usan corrientemente porque resisten la corrosión inducida por la mayor parte de las aguas dulce y salada.

Una notable excepción la constituye el hecho de que el oxígeno retarda grandemente la corrosión del acero inoxidable. El oxígeno o los agentes oxidantes tales como el ácido nítrico forman una película protectora invisible que reduce el efecto corrosivo. Cuando esto sucede, se dice que el metal se ha vuelto pasivo. La condición superficial pasiva del acero inoxidable 18-8 es muy estable.

Se puede considerar que una rejilla de pozo hecha de hierro o acero tiene una duración muy exigua en presencia de la mayoría de las aguas. Mediante galvanización, o sea, agregando una capa de zinc, la duración del metal base puede extenderse un poco debido a la protección galvánica. Pero esto será así hasta que una buena parte del zinc haya sido sacrificada, después de lo cual, sobrevendrá la corrosión del metal de base.

Factores que Inciden en la Velocidad de la Corrosión

Los elementos presentes en el agua que aceleran la corrosión de las rejillas de pozos son los siguientes, a saber: (1) dióxido de carbono disuelto, (2) oxígeno disuelto, (3) sulfuro de hidrógeno disuelto, y (4) un alto contenido de sólidos disueltos totales, que aumentan la conductividad eléctrica del agua. Las aguas duras son consideradas, por lo general, como no corrosivas, pero si al mismo tiempo, la conductividad eléctrica del agua es alta debido a la presencia de

cloruros y sulfatos, aquéllas podrán corroer rápidamente el hierro y el acero.

La velocidad con que circula el agua influye también en la velocidad de corrosión, principalmente por el efecto que ejerce en otros factores involucrados en la manifestación de la misma. El movimiento sobre las superficies metálicas de una rejilla hace circular el elemento corrosivo a una velocidad mayor que si el agua estuviese quieta. Sin embargo, una velocidad baja puede resultar favorable, puesto que tiende a que la corrosión sea más uniforme y además evita el ataque concentrado y localizado que a menudo tiene lugar en las aguas en reposo. Pero la regla general es que la corrosión aumenta conforme la velocidad es mayor. Una velocidad muy alta podría desprender las películas protectoras que, de otra manera, llegarían a formarse sobre la superficie del metal. Esto a su vez aumenta la velocidad de corrosión. La experiencia demuestra que las velocidades bajas de entrada del agua a las rejillas reduce el ataque corrosivo sobre éstas.

El hidrógeno sulfurado no sólo corroe rápidamente el acero, sino que también ataca a la mayor parte de las aleaciones a base de cobre, si el gas se encuentra en proporción apreciable en el agua. La reacción que se lleva a cabo produce sulfuro de cobre. Este último es insoluble y puede depositarse en las aberturas de la rejilla. El resultado puede conducir a una situación tal en que el metal es destruído por el fluído corrosivo y el producto de la corrosión, depositado en las aberturas de la rejilla, causa al mismo tiempo incrustación.

Cuando el agua contiene menos hierro del máximo que es capaz de llevar en solución corroe el hierro o el acero rápidamente, a menos que una película protectora o costra, de algún material, cubra la superficie metálica. El agua no saturada tiende a disolver parte del metal de las superficies de la rejilla, ademe del pozo o sistemas de tubería, hasta que se satura con respecto al hierro. Si el contenido mineral del agua es tal que no se llega a formar la película protectora, por la deposición de materiales insolubles, puede presentarse una severa corrosión. La explicación técnica del mecanismo correspondiente de corrosión se sale de los alcances de este capítulo. Sin embargo, debido a su importancia, se han incluído en el Apéndice algunos de sus fundamentos, como extractos de una investigación sobre corrosión severa de ademe de acero para pozos realizada en Nigeria por científicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Uno de los aspectos que entraba la realización de un estudio más exacto del efecto que producen las aguas naturales sobre las rejillas de pozos, es el de que los minerales y gases disueltos en el agua no siempre son determinados en una forma completa y exacta. Probablemente siempre será difícil poder medir la cantidad de gases disueltos en el agua subterránea. Desafortunadamente, pues algunos de los gases disueltos son los factores que determinan la agresividad relativa del agua.

En su estado natural, el agua de un acuífero se halla a cierta presión hidrostática. Cuando se extrae una muestra del fondo de un pozo o de un agujero de prueba hasta la superficie, la presión de la muestra inevitablemente baja, y como resultado de ello, parte de los gases disueltos se escapa. De esta manera, se ve que casi nunca se puede tomar una muestra verdaderamente representativa para ser analizada en el laboratorio.

Las rejillas fabricadas de materiales resistentes a la corrosión, aún cuando son de un costo más alto, resultan a la postre más económicas que las construídas de materiales inferiores. La economía largo plazo la única que merece este nombre, no guarda necesariamente mucha relación con el precio unitario del material, o con el costo inicial de una estructura o un producto.

Esto es estrictamente cierto al escoger el

metal durante el diseño de una rejilla. El fabricante de rejillas de pozos construídas por el procedimiento de soldadura eléctrica, le permite al ingeniero escoger una rejilla hecha de uno cualquiera de la lista de metales y aleaciones. La rejilla puede fabricarse de cualquier metal o aleación cuyas propiedades permitan el empleo de la soldadura eléctrica.

La posibilidad de elegir cubre un rango que va desde los aceros inoxidables y bronces más resistentes a la corrosión, hasta el acero ordinario de bajo contenido de carbono.

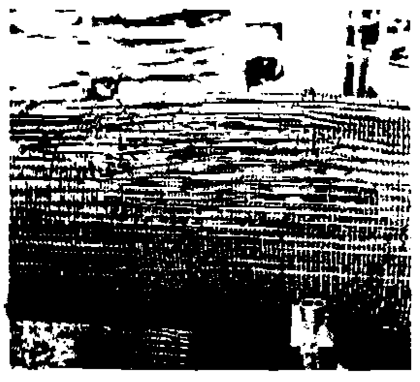


Fig. 319: Rejilla Johnson de Hierro Armco, instalada en un pozo de Eau Claire, Wisconsin, en 1945, que sufrió el ataque de la corrosión y fue extraída en 1961.



Fig. 320: Rejilla Johnson de Everdur, instalada en un pozo de Eau Claire, Wisconsin, que se hallaba en perfectas condiciones cuando fue extraída en 1947. Reinstalada un poco después en un nuevo pozo cercano, le ha servido a la ciudad por 32 años, y todavía se halla en uso.

La introducción de una aleación de bronce, bajo el nombre comercial de "Everdur", hace unos 35 años, por la American Brass Company, trajo a la industria de los pozos de agua una aleación valiosa y económica. Esta aleación contiene alrededor de 96 por ciento de cobre, 3 por ciento de silicio y uno por ciento de manganeso. Su resistencia a la corrosión excede la de cualquiera de las aleaciones de bronce o latón, puesto que no contiene zinc. Su contenido de manganeso le imparte la misma resistencia a la tensión que la del acero. El contenido de silicio hace que la aleación sea susceptible de poder soldarse.

El hecho de ser susceptible de soldarse y la alta resistencia de que dispone, hacen que el Everdur pueda aplicarse a la manufactura de rejillas de pozos, mediante soldadura a resistencia, obteniéndose una estructura enteramente soldada.

La Primera Rejilla de Everdur para Pozo

El primer uso que se le dió al Everdur en la fabricación de rejillas de pozos, fue la manufactura de una Rejilla Johnson que se instaló en un pozo de agua de un invernadero cercano a Saint Paul, Minn., en el año de 1931. Este pozo se utilizó contínuamente hasta 1961, cuando el propietario permitió la extracción de la rejilla con el propósito de examinar la condición en que se hallaba. Un examen cuidadoso no mostró evidencia de corrosión ni de otros daños que pudiera haber sufrido la rejilla.

Los millares de rejillas de Everdur que se han instalado desde entonces, dentro de casi todos los tipos de agua subterránea, tanto dulce como salada, le han brindado un servicio excelente y económico a los propietarios durante un periodo de 35 años. Sin embargo, entre los varios miles de instalaciones, las aguas de algunas pocas localidades han atacado al metal y corroído

las rejillas en un período de 4 a 12 años, al extremo de tener que sustituirlas.

Las investigaciones de las causas de la corrosión de rejillas de Everdur, han indicado la probabilidad de que el oxígeno disuelto en el agua haya sido el responsable de la corta duración experimentada en algunos casos, en tanto que las condiciones que impiden la formación de una película protectora, pudieran haberlo sido en otros casos. Las condiciones de oxidación causan una corrosión más rápida de la mayor parte de las aleaciones de cobre cuando éstas se encuentran sumergidas en agua. Es por lo tanto razonable suponer que el oxígeno en el agua es uno de los factores determinantes de que las rejillas de Everdur se hayan corroído.

Por fortuna, en la fabricación de rejillas soldadas para pozo, se puede recurrir al acero inoxidable para obtener una resistencia específica cuando se presentan condiciones de oxidación. El acero inoxidable, de hecho requiere cierta exposición al oxígeno para alcanzar su máxima resistencia a la corrosión.

El oxígeno se combina con la superficie de la aleación para formar así una película protectora invisible. En tanto la película se mantenga intacta, el metal se hallará en su condición pasiva y su resistencia a la corrosión se vuelve extremadamente alta.

Cuando se sabe que el oxígeno disuelto se halla presente en cantidades mayores que de ordinario en el agua que se está bombeando, la rejilla de acero inoxidable constituye la mejor elección.

Se dispone de muchos tipos diferentes de aleaciones de acero inoxidable. Se ha encontrado que el acero inoxidable tipo 304 resulta ser el más práctico para rejillas de pozo. Este contiene más de 18 por ciento de cromo y más de 8 por ciento de níquel, con alrededor de un 72 por ciento de hierro y no más de 0.08 por ciento de carbono. Su contenido 18-8 de cromo y níquel, le imparte su excelente resistencia a la corrosión. Su bajo contenido de carbono es muy importante para que pueda soldarse.

El costo por kilogramo del acero inoxidable tipo 304 es de alrededor de seis veces el del acero ordinario galvanizado. Sin embargo, la rejilla fabricada enteramente de

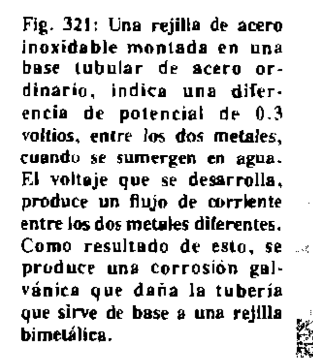


Fig. 321: Una rejilla de acero inoxidable montada en una base tubular de acero ordinario, indica una diferencia de potencial de 0.3 voltios, entre los dos metales, cuando se sumergen en agua. El voltaje que se desarrolla, produce un flujo de corriente entre los dos metales diferentes. Como resultado de esto, se produce una corrosión galvánica que daña la tubería que sirve de base a una rejilla bimetálica.



acero inoxidable sólo cuesta un poco más que la fabricada con acero galvanizado de bajo contenido de carbono.

El metal Everdur es normalmente más resistente a la corrosión en agua de mar que el tipo 304 de acero inoxidable. Pero cuando las condiciones son tales, que una considerable cantidad de oxígeno disuelto se halla presente en el agua del mar, extraíble mediante pozos instalados en la costa, la elección deberá inclinarse hacia el acero inoxidable tipo 304, ante la posibilidad de que existan condiciones de oxidación.

Es importante recordar que el ataque corrosivo de las rejillas se manifiesta en condiciones de una continua sumergencia en el agua. Esta condición difiere considerablemente de la que propicia el ataque de la corrosión en aquéllas estructuras emplazadas sobre el terreno y que alternativamente se encuentran húmedas y secas. Las medidas que se tomen para solucionar un problema de corrosión de rejillas pueden resultar efectivas en el medio de continua inmersión. Otras medidas no lo son. Por ejemplo, algunas capas protectoras orgánicas que protejen con éxito las estructuras de acero que se hallan sobre el terreno brindan sólo una protección limitada, cuando las condiciones son de una contínua immersión.

A menudo se conocen referencias de la corrosión bacterial del hierro y del acero. Esto da la impresión de que existieran ciertos tipos de bacterias que atacan directamente a los metales. Tal suposición es incorrecta. Lo que puede ocurrir, sin embargo, es un aumento de la tendencia corrosiva del agua, como resultado del ciclo de desarrollo y de los hábitos alimenticios de ciertas bacterias. Estas en realidad transforman ciertos minerales disueltos del agua subterránea, y si se hallan en la vecindad de un pozo, podría ocurrir una corrosión más rápida de la rejilla y del ademe. La denominada bacteria reductora del sufato puede producir este efecto.

Estos organismos, a través de una serie de etapas bastante complicadas de su crecimiento y reproducción, pueden llegar a reducir el sulfato de calcio. Ello da por resultado la formación de cierta cantidad de hidrógeno sulfurado y de ácido sulfúrico. Ambos reactivos hacen al agua más corrosiva, y apresuran el ataque al hierro y al acero.

Nadie tiene todas las respuestas: la corrosión es un problema muy evasivo. No obstante, el estudio constante y la observación de aquellas rejillas de pozo que hayan estado instaladas por largos períodos de tiempo, aumentarán año a año nuestro bagaje de conocimientos y contribuirán a agudizar nuestra capacidad de elección de los materiales adecuados a las rejillas, en beneficio económico del propietario del pozo.

Referencias

1. SPELLER, F. M., "Corrosion — Cause and Prevention." Third Edition (1951). McGraw-Hill Book Co., New York.
2. WESLEY, W. A., "Controlling Factors in Galvanic Corrosion". Proceedings, American Society for Testing Materials, Vol 40, pp 690. (1940). Philadelphia.
3. LALDERBAUGH, A. B. "Fundamentals of Galvanic Corrosion," pp 13. (1950), American Gas Assn., New York.
4. FONTANA, M. G., "Pitting and Dezincification," Journal Industrial and Engineering Chemistry, Vol 39, No. 5. (1947). American Chemical Society, Washington.
5. SHEMA, B. F., "Sulfate-Reducing Bacteria." The Betz Indicator. Vol 31, No 6, pp 3-8. (1962), Betz Laboratories, Inc. Philadelphia.
6. CLARKE, Frank, and BARNES, Ivan, "Study of Water-Well Corrosion, Chad Basin, Nigeria." Open File Report, (1965). U. S. Geological Survey, Washington.

Capitulo 18

Elementos del Tratamiento del Agua

CASI SIEMPRE, las aguas de pozo necesitan una menor purificación que las de superficie, debido a que su tratamiento se ha adelantado por vía natural, al ser filtradas hasta un grado tal que no es fácil de alcanzar por filtración mecánica. La Fig. 322 establece una comparación entre los tratamientos que normalmente se necesitan aplicar a las aguas de superficie y a las de pozo.

El propósito del tratamiento del agua es el de mejorar su calidad bacterial y química. El uso final que se le vaya a dar es el que determina, en gran medida, cuánto tratamiento se justifica aplicar. Por ejemplo, si el abastecimiento va a utilizarse solamente en agricultura, riego y ganadería, la contaminación bacterial y la turbiedad son de poca importancia. Para el riego, se prefiere el agua dura, pero la dureza es un inconveniente para el lavado de ropa.

Hoy día se desea que el agua para abastecimiento municipal sea algo más que simplemente una agua clara y libre de bacterias patógenas. Se exige que sea suave, libre de sabores y olores, y de una calidad tal, que no sea corrosiva ni produzca incrustaciones, ni tampoco descolore los accesorios de plomería o la ropa. Además de la desinfección, que protege la calidad bacterial del agua, la suavización, conjuntamente con la eliminación de olores, sabores y otras materias inconvenientes, constituyen un tratamiento que hacen al agua más apetecible y útil.

Entre los factores que deben de considerarse al elegir algún tratamiento especifico del agua están los costos iniciales de operación, las características del agua cruda, las limitaciones de espacio, los planes de expansión futuros, la calidad que se desea para el efluente, y la disponibilidad de personal diestro.

Métodos Modernos de Tratamiento

Actualmente se usan ciertos métodos de tratamiento de agua para llenar las exigencias modernas. Todavía se utilizan el almacenamiento y la sedimentación sencillos, para sedimentar la materia en suspensión y mejorar la apariencia del abastecimiento, pero estos métodos, en gran medida, han sido ya sea suplementados o sustituídos por procedimientos más eficaces. Se puede obtener una rápida sedimentación

agregando al agua reactivos químicos coagulantes, y filtrándola y sedimetándola luego. La aireación, el tratamiento químico o el empleo del carbón activado reducen o evitan los sabores y los olores. La suavización, la remoción del hierro y la corrección de la corrosividad constituyen todos metodos prácticos de tratamiento que día a día se usan más, conforme la comunidad reconoce su conveniencia y ventajas economicas.

El tipo de tratamiento que deba usarse varía mucho, dependiendo de la fuente de abastecimiento, puesto que es ésta la que determina la naturaleza del agua. Los métodos de tratamiento que en forma breve se describen en este capítulo son aplicables tanto a las aguas superficiales, como a las subterráneas. Debido a sus características tan favorables, el agua subterránea requiere por lo general de un menor grado de tratamiento. Aquí se discuten los métodos principales, con el objeto de poder establecer una comparación de los costos de tratamiento exigidos por las aguas de ambas procedencias.

Las aguas de origen superficial se hallan por lo general sujetas a una contaminación mayor y son más o menos turbias. Así pues, se encuentran más propensas a necesitar coagulación, sedimentación, filtración, suavización, desinfección y corrección de su corrosividad. Algunas pocas comunidades que obtienen agua excepcionalmente límpida de lagos o embalses, puede que sólo necesiten aplicar una desinfección, pero en esta forma no se obtiene un alto factor de seguridad como se lograría si se utilizase también la filtración, en el proceso de purificación.

Por otro lado, las aguas subterránes son por lo general límpidas. Estas no requieren filtración para eliminar su turbiedad. Puede que se necesite alguna eliminación de hierro, suavización, correción del grado de corrosividad o de sus tendencias incrustantes. Rara vez se presenta el problema de suprimir olor y sabor de las aguas de pozo, el que sí es muy frecuente en las aguas de superficie. Algunas pocas aguas contienen hidrógeno sulfurado, el que debe eliminarse para suprimir así el olor y el efecto corrosivo de este gas.

Sedimentación

El agua que fluye en una corriente natural es por lo general turbia, puesto que arrastra en suspensión arena, limo, arcilla y otras materias. Cuando la corriente se hace más lenta, tanto la arena como el limo y una parte

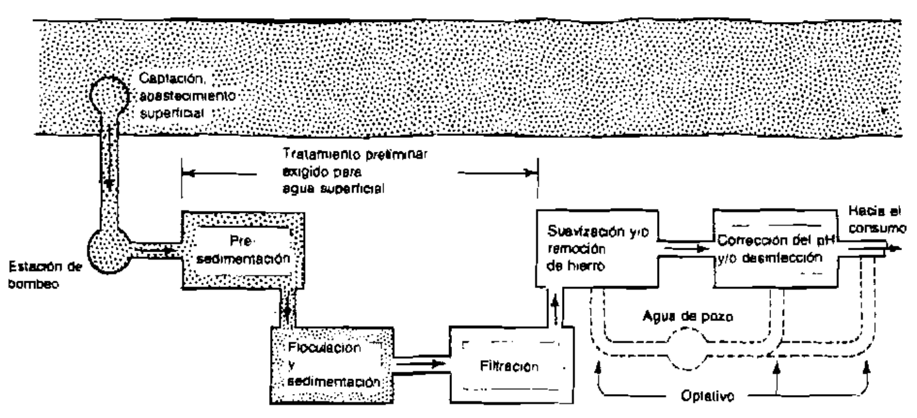


Fig. 322: Algunos de los pasos necesarios para la purificación de las aguas provenientes de fuentes superficiales, no se requieren en las aguas subterráneas, en particular los tres primeros procesos indicados en este diagrama. La sucesión de etapas puede variar de la que se indica en éste.

de las partículas de arcilla empiezan a precipitar. Si el agua turbia es conducida a un embalse y se le deja en reposo, una buena parte de la materia en suspensión es eliminada mediante *sedimentación sencilla*. Este proceso tan simple, es el primer paso que por lo general se utiliza en la depuración de las aguas de superficie.

Antes de que se desarrollasen métodos más eficaces para el tratamiento del agua, algunas ciudades dejaban que ésta estuviese almacenada durante semanas o meses en embalses o depósitos, para mejorar su calidad hasta un punto en que se pudiese considerar razonablemente depurada. De esta manera, el almacenamiento prolongado del agua reduce su turbiedad y el recuento bacterial, pero el procedimiento no es económico ni logra que el agua llegue a ser absolutamente segura.

Algunas ciudades toman su agua de ríos tales como el Mississippi o algunos de sus afluentes, los cuales son altamente turbios. Parte de la materia que se halla en suspensión es de granulometría gruesa y sedimenta rápidamente. Como la cantidad de materia en suspensión es grande, resulta ventajoso en este caso disponer de tanques de *presedimentación* que retengan el agua durante periodos de 3 a 8 horas. En esta etapa se logra sedimentar una buena parte de la materia gruesa en suspensión. Ello ayuda a evitar el que se recarguen las unidades de clarificación y reduce el gasto de reactivos químicos del proceso completo de purificación.

Coagulación

La sedimentación simple resulta muy práctica para la eliminación de partículas en suspensión que sean capaces de sedimentar en un periodo de uno a varios días. Pero no resulta conveniente en las aguas lodosas que arrastran partículas arcillosas y coloidales. Estas partículas más pequeñas se precipitan a una velocidad mucho menor que las más grandes.

Para acelerar la acción, se utilizan entonces medios artificiales de coagulación, o sea, de agrupar las partículas en grumos sueltos, para permitir así que las que son pequeñas y se hallan en suspensión, sean eliminadas en una forma práctica mediante sedimentación. Los reactivos químicos, conocidos como coagulantes, se agregan al agua para formar coágulos o flóculos químicos que adsorban, entrapen o agrupen en masas mayores, las partículas en suspensión.

El coágulo viene a ser el resultado de la actividad química del coagulante con la alcalinidad del agua. Se forma así una masa frágil, opaca y gelatinosa. Los reactivos químicos que más comúnmente se emplean en la coagulación, son el sulfato de aluminio y el sulfato ferroso.

La coagulación se desarrolla en tres etapas fundamentales: (1) la neutralización de las cargas negativas de las partículas de arcilla que se hallan en suspensión en el agua, (2) la agrupación de las partículas en forma de coágulos o grumos, (3) la adsorción de las partículas en las superficies más grandes provistas por el flóculo. Algunas bacterias quedan aprisionadas en el flóculo y son arrastradas hacia abajo cuando las masas coaguladas se sedimentan en el fondo. En la Fig. 323 se muestra un coagulador de tipo moderno.

Clarificación

Una vez que los coagulantes se han mezclado con el agua, ésta se hace pasar a un tanque sedimentador que se conoce como clarificador. En esta unidad se retiene el agua lo suficiente como para permitir que la materia coagulada se sedimente. Este efecto puede considerarse como una sedimentación química catalizada.

Las partículas coaguladas más pesadas sedimentan inmediatamente, pero las menores, más livianas, permanecen en suspensión. Estas últimas son arrastradas junto con el efluente del clarificador y

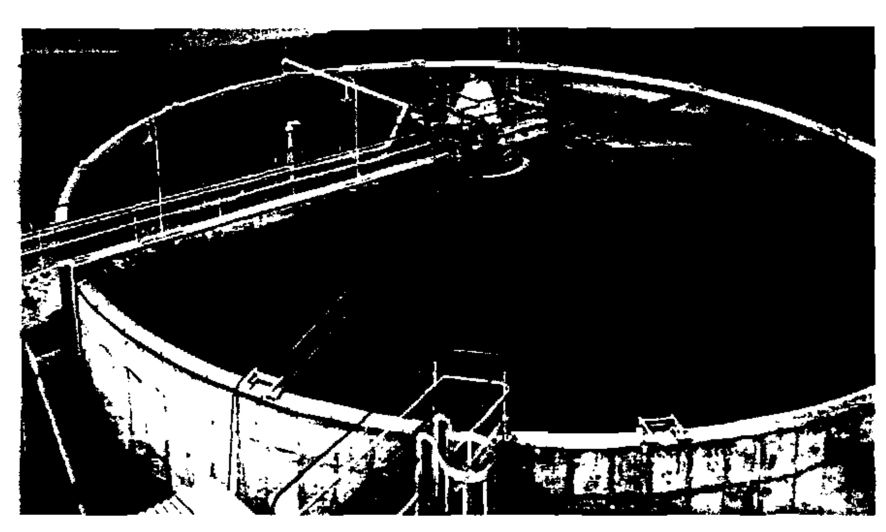


Fig. 323: Coagulador moderno, de 19 m. de diámetro, con una capacidad de 1.360 m³/h., empleado en el tratamiento de un abastecimiento de agua que se surte de una fuente superficial.

(Cortesía de Graver Water Conditioning Company)

eliminadas en la siguiente etapa del proceso, que se denomina filtración.

Las unidades de contacto, conocidas también como *unidades de flujo ascendente*, permiten combinar la mezcla, la coagulación y la clarificación en una sola estructura, reduciendo de este modo el espacio y disminuyendo los costos de inversión. Puesto que el agua cruda que afluye a éstas se halla en estrecho contacto con los reactivos agregados y previamente coagulados, se acelera así la continua formación de nuevos flóculos.

La Fig. 324 muestra en forma esque-

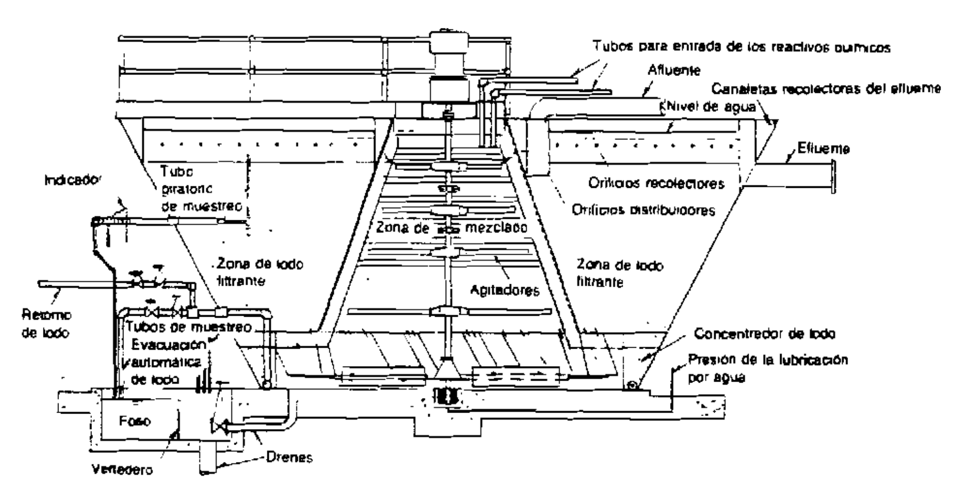


Fig. 324: Esta sección transversal vertical muestra el diseño mecánico y el principio en que se basa la operación de una unidad moderna de contacto, de flujo ascendente en la cual la mezcla, floculación, clarificación y la remoción de lodos, se realizan en forma continua y simultánea.

(Cortesía de The Permutit Co.)

mática una unidad de flujo vertical o ascendente. En estas unidades se forma una suspensión como una pasta aguada que flota en el tanque a cierta distancia del fondo. El agua ingresa a la unidad por el fondo, atravesando la capa en suspensión en su movimiento ascendente y el efluente es descargado en la parte superior. Estas unidades operan a caudales elevados. Sin embargo, para hacerlas funcionar con propiedad, se necesitan personas adiestradas.

Filtración

Cuando se hace fluir a través de un medio poroso, tal como lo es la arena, parte de las impurezas coloidales y en suspensión del agua, son atrapadas dentro de los poros, o en la superficie de los granos de éstas arenas o del medio que sea. Este proceso se denomina *filtración*.

La sedimentación, ya sea con coagulación o sin ésta, no brinda, por lo general, un tratamiento adecuado al agua proveniente de fuentes superficiales. Para producir agua clara libre de bacterias, se requiere una filtración.

La filtración natural constituye un proceso activo e importante en la autopurificación del agua subterránea. De la observación de que las aguas subterráneas se hallan por lo general libres de turbiedad nació quizá la idea de emplear por primera vez los filtros de arena en gran escala para el tratamiento del agua de superficie.

Existen varios tipos de filtros que se usan en el tratamiento del agua.

En Gran Bretaña se usó por primera vez el *filtro lento de arena* en el siglo diecinueve. Estos filtros se emplean todavía en algunas ciudades grandes de los Estados Unidos, en las que las instalaciones fueron construidas antes del advenimiento del método de filtración rápida. Los elementos característicos del filtro lento de arena son los siguientes: alimentación con agua cruda sin pretratamiento químico, razones lentas de filtración, limpieza mecánica de la camada de arena filtrante mediante rastrillado y remoción de alrededor de 2.5

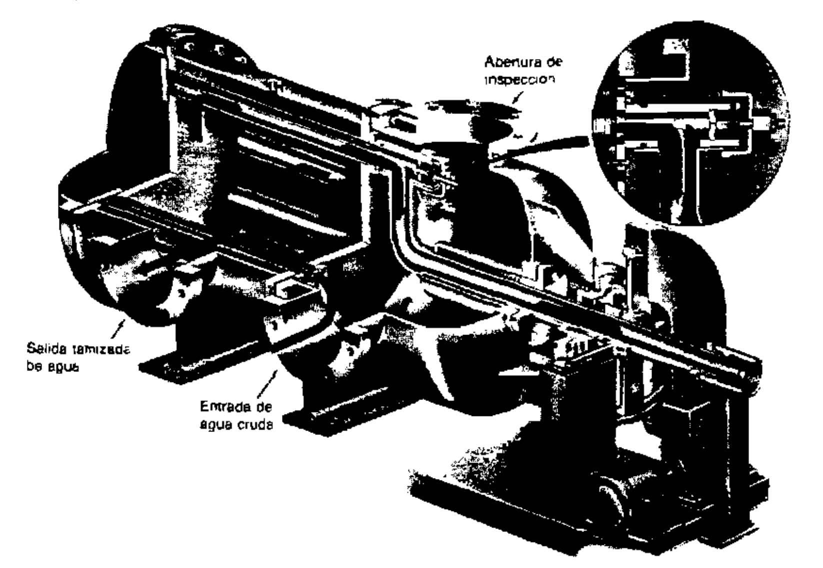


Fig. 325: Tamizador automático de agua usado para la remoción de materia en suspensión, el que automáticamente lava uno de los elementos coladores, mientras los otros permanecen dentro de la corriente de agua. Los elementos coladores están constituidos por Rejillas Johnson.

(Cortesía de R. P. Adams Company)

... del material, cuando tiene lugar la colmatación.

En *filtro rápido de arena* ha llegado a sustituir grandemente en los Estados Unidos al filtro lento, por su mejor adaptabilidad a las aguas más turbias. Las características esenciales del filtro rápido de arena son las siguientes, a saber:

1. Altas razones de filtración (aproximadamente 30 veces más altas que las del filtro lento).

2. Pretratamiento cuidadoso del agua como preparación antes de filtrarla.

3. Lavado de las unidades filtrantes mediante la inversión del flujo de agua filtrada, haciéndolo ascender para desprender la materia que haya quedado atrapada en la arena. Se utilizan ampliamente los filtros rápidos de arena, tanto del tipo de gravedad como de presión. Estos últimos operan conjuntamente con la tubería de presión, lo que a menudo elimina la necesidad de un doble bombeo.

Filtración Diatomácea

Existe un tipo de filtro rápido especializado, conocido como filtro diatomáceo, el que elimina la materia suspendida en el agua, forzando ésta a pasar a través de delgadas capas de tierra diatomácea. La tierra diatomácea se extrae comercialmente de depósitos que contienen residuos silíceos de ciertas plantas acuáticas llamadas diatomas. Las partículas de diatomita consisten de conchas muy pequeñas constiuídas casi por sílice puro, que son los esqueletos

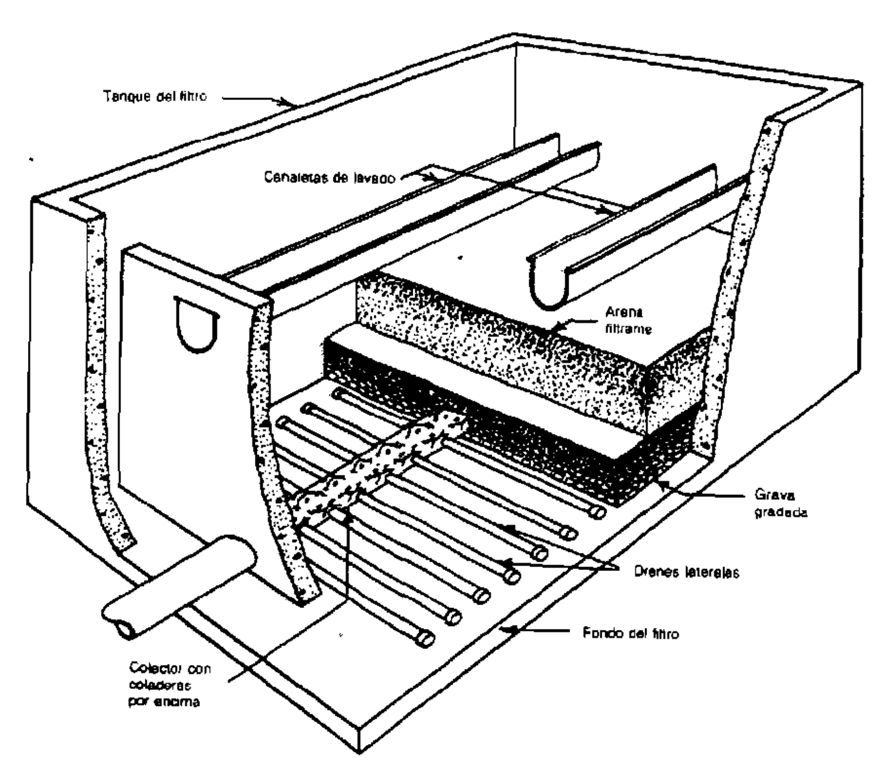


Fig. 326: Detalles constructivos de un filtro rápido de arena del tipo que funciona por gravedad; el sistema de drenaje sirve también para retrolavar el filtro cuando se invierte el flujo.
(Cortesía de American Water Work Ass.)

de diatomas fósiles. Los filtros de diatomita se desarrollaron primero como unidades portátiles para que las usaran las fuerzas militares destacades en regiones tropicales. Las filtros de diatomita eliminan los quistes de amebas y ciertos otros microorganismos que no siempre son eliminados por los filtros de arena y que no se pueden aniquilar fácilmente mediante la cloración.

Por lo general, los filtros de diatomita son de presión, pero también pueden ser del tipo abierto que funcionan mediante el vacío producido por una bomba de aspiración. La unidad consiste de un agrupamiento de elementos filtrantes cilíndricos contenidos en un tanque metálico. Al dar comienzo a una carrera de filtración, se alimenta el tanque con una suspensión de tierra diatomácea, conjuntamente con el agua que va a filtrarse. Conforme el agua va pasando a través de las aberturas comprendidas entre los elementos filtrantes, la diatomita queda atrapada en la superficie de éstos, formándose así una capa filtrante o camada. Esta fase recibe el nombre de pre-revestimiento. Los elementos filtrantes sostienen el revestimiento de diatomita, la que a su vez filtra el agua que pasa a través. El agua ya filtrada descarga en el extremo abierto de cada elemento cilíndrico, dentro del compartimiento de agua clarificada del tanque.

Cuando la camada filtrante se obstruye o colmata con las partículas que se han desprendido del agua, se lava el filtro mediante la inversión del flujo y la apertura de la válvula de evacuación. El retrolavado rompe la camada filtrante y la elimina junto con el agua. Después del lavado se aplica un nuevo pre-revestimiento y se inicia otra vez la filtración.

Desinfección

La desinfección del agua significa la aniquilación de todos los organismos potencialmente peligrosos que puedan hallarse presentes. La cloración es el medio por excelencia para desinfectar el agua potable. Otros reactivos que también se



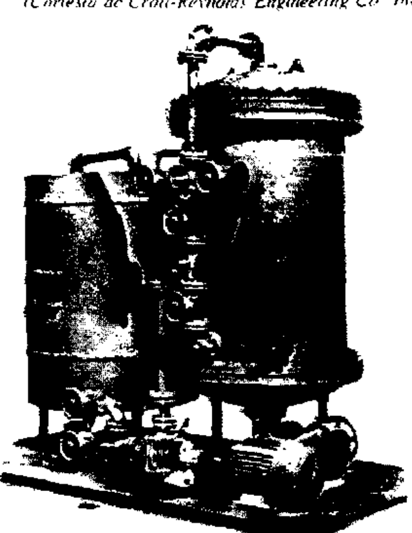


Fig. 327: (Izquierda) Unidad demostrativa de un filtro de diatomita, en que se muestra el elemento filtrante revestido de tierra diatomacea, durante el ciclo de filtracion: el prototipo de la derecha contiene un agrupamiento de elementos filtrantes dentro de un tanque a presión.
(Cortesía de Croll-Reynolds Engineering Co. Inc.)

utilizan son el ozono, el yodo y el permanganato de potasio. La desinfección también puede lograrse mediante ebullición, pasteurización, o exponiendo el agua a los rayos ultravioleta.

El agua proveniente de fuentes superficiales y de pozos que intercepten rocas fracturadas u otros acuíferos que pudieran estar sujetos a contaminación, debe desinfectarse, aunque haya recibido otro tratamiento, porque ninguna otra etapa del proceso de purificación elimina de seguro todos los organismos patógenos. Aunque el agua subterránea no se halla contaminada en la mayor parte de los acuíferos, y constituye un abastecimiento seguro, la cloración viene a ser siempre un factor de seguridad adicional. Esta, asimismo, garantiza una protección durante la distribución y el manejo del agua antes de que llegue a los puntos de consumo.

El cloro ofrece muchas ventajas durante el tratamiento del agua. Este es de bajo costo, confiable y relativamente sencillo de manipular. En leve contenido de cloro residual en el agua, después de la purificación, actúa como un trazador que indica la presencia del agente desinfectante en cualquier punto del sistema de abastecimiento.

La adición de cloro al agua pura, forma ácido hipocloroso y ácido clorhídrico. Es el primero de éstos el que determina las principales propiedades desinfectantes y oxidantes de las soluciones de cloro.

Si el agua es impura y contiene algo de materia orgánica, amoníaco, hierro, manganeso o hidrógeno sulfurado, tanto el cloro como el ácido hipocloroso reaccionan con una parte de éstos para formar otros compuestos solubles e insolubles. La parte que reacciona con el amoniaco da lugar a la formación de cloraminas, las que, como el cloro libre, contienen propiedades desinfectantes. Se considera, sin embargo, que bajo la forma de cloraminas la eficacia del cloro disponible queda reducida considerablemente, por lo que para desinfectar, se necesita una dosificación mucho mayor.

El cloro que reacciona con la materia orgánica y con materiales disueltos tales como el hierro, manganeso, e hidrógeno sulfurado, pierde su poder desinfectante. Esta cantidad, por lo tanto, no se utiliza en la purificación y recibe el nombre de *demanda de cloro* del agua. La dosificación de cloro que se aplique, debe ser la suficiente como para satisfacer la demanda y dejar el suficiente remanente para desinfección.

El cloro residual es aquella cantidad de cloro disponible para desinfección, una vez que la demanda de los agentes consumidores de cloro haya sido satisfecha. La demanda de cloro varía con la cantidad de sustancias que lo consumen, presentes en el agua, pero no se puede medir directamente. En consecuencia, ésta se determina haciendo la diferencia entre la cantidad de cloro que se haya aplicado al agua, y la magnitud del cloro residual después de transcurrir un cierto período de contacto.

El término *cloro disponible combinado* se refiere al cloro residual disponible para desinfección que se encuentra en forma de cloramines. A la vez que se aumenta la dosificación de cloro, el residual sube hasta un cierto nivel para disminuir luego hasta un punto tal, en que éste aumenta de nuevo, si se agrega más cloro. La dosificación a la cual se manifiesta el mínimo cloro residual se denomina el punto de inflexión. La adición de una cantidad suficiente de cloro para alcanzar el punto de inflexión se denomina *cloración al punto de inflexión.*

Existe la creencia de que todos los compuestos de amoníaco y varios del nitrógeno, presentes en el agua, quedan completamente oxidados en el punto de inflexión. A partir de ahí, no se forman más cloramines, de suerte que el cloro residual, más allá de ese punto, se halla principalmente en forma de ácido hipocloroso. Este residuo de cloro se denomina *cloro libre disponible.*

La cloración al punto de inflexión ofrece dos ventajas: provee un residuo de cloro libre, y al desarrollar éste, destruye, en ciertas clases de agua, los olores y los sabores.

La demanda de cloro, en la mayoría de las aguas tratadas purificadas, queda satisfecha dentro del término de unos 10 minutos

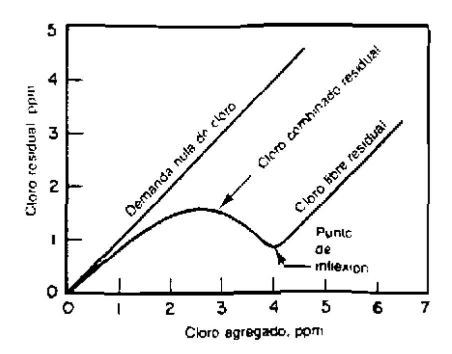


Fig. 328: La curva muestra como varía el cloro libre disponible cuando la dosificación total de éste aumenta hasta el punto de inflexión y mas halla de éste.

después de su aplicación. Por lo general se permite un período de contacto de alrededor de 30 minutos antes de que el agua sea consumida o inyectada al sistema de distribución, para garantizar una seguridad adicional. Mediante esta práctica, se logra la dosificación mínima necesaria para que la concentración de cloro residual sea del orden de 0.1 a 0.4 ppm después del período referido.

Si se usa un exceso de cloro, el período de contacto, antes de que el agua entre al consumo, puede reducirse considerablemente. Pero ello tiene la desventaja de que el agua se satura de un fuerte sabor a cloro. Sin embargo, este problema puede resolverse declorando el abastecimiento antes de que se utilice. Esta combinación se denomina sobre-cloración y de-cloración.

El procedimiento anterior puede resultar práctico al desinfectar los abastecimientos de viviendas individuales y otras pequeñas obras de suministro. Cuando la fuente de abastecimiento consiste de embalses, lagos, o pozos que alumbren acuíferos contaminados, (por lo general rocas fracturadas a profundidades someras), el suministro de agua que se deriva no resulta digno de confianza y debe de desinfectarse adecuadamente.

Siempre que la tubería de un abastecimiento sea tal que derive toda el agua de un tanque, se puede lograr una mezcla casi perfecta, si el cloro se introduce directamente en el sistema de tubería, un poco adelante del tanque de presión. La posibilidad de obtener un período de contacto con tal procedimiento, es muy limitada. Si se llega a alcanzar un período de unos 7 minutos, se necesitará un residuo de cloro de unas 5 ppm para garantizar la desinfección. Cuando se le compara con unas 0.2 ppm de residual, después de 30 minutos de contacto, como sucede en las plantas municipales de tratamiento, tal nivel tan alto de cloro bien podría clasificarse como sobre-cloración.

La remoción del olor de cloro de una agua sobre-clorada se logra generalmente haciendo pasar ésta a través de carbón granular activado. El dispositivo comercial que se conoce como filtro de carbón sirve para ser instalado en el sistema, en un punto adecuado después del tanque de almacenamiento.

El uso de cloro sólo, o sin ningún otro tratamiento, excepto el almacenamiento, se conoce como *cloración simple*. La super cloración, que acabamos de describir, constituye un ejemplo de cloración simple de sistemas pequeños de abastecimiento de agua. Cuando se utiliza la cloración sencilla, como única protección contra el agua municipal o industrial que se haya obtenido de un lago o de un embalse superficial, la demanda de cloro puede que sea muy alta.

Deberá entonces agregarse suficiente cloro al agua para asegurarse de que existe un residuo de cloro en todo el sistema de distribución. Puede que se tenga que considerar un rango amplio de variaciones para mantener el residio durante las diferentes épocas del año.

La cloración simple es algo muy común en muchos sistemas municipales e industriales cuya agua se obtiene de pozos. Esta resulta muy práctica porque el agua subterránea obtenida de la mayor parte de los acuíferos constituidos por arena es de muy buena calidad sanitaria. Se necesita sólo una pequeña dosificación de cloro para agregar un factor de seguridad al consumo del agua por el público. La demanda de cloro de una agua tal es baja, haciendo que sea muy fácil el mantener un residuo realmente positivo a un bajo costo.

En aquellas plantas de tratamiento que comprenden dos o mas de las fases de purificación indicadas por la Fig. 322 deberá siempre agregarse cloro al comienzo o al final del proceso de tratamiento.

Tratamiento con Rayos Ultravioleta

Los rayos ultravioleta están en capacidad de destruir la bacteria. Exponiéndola en delgadas láminas, a estos rayos, el agua clara puede ser desinfectada. El efecto germicida de los rayos ultravioleta depende de la intensidad de éstos y del tiempo de exposición. A baja intensidad, la exposición deberá durar unas 24 horas, cuando la intensidad es alta, podría bastar con sólo un segundo de exposición.

La luz ultravioleta se produce haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una lámpara de fusibles de cuarzo y que contenga vapor de mercurio. En este tipo de lámpara, el cuarzo es transparente a los rayos ultravioleta.

La intensidad dentro de un medio líquido disminuye con la distancia a que éste se halle de la lámpara. La eficacia de la desinfección queda reducida grademente a su vez, por la presencia de turbiedad y color en el agua. El equipo empleado se diseña por lo general de tal manera que toda el agua pasa a una distancia que varía entre 2.5 y 12.5 cm. del tubo de cuarzo. Cuando la intensidad es baja, el desplazamiento deberá ser lo bastante lento como para proveer suficiente tiempo de exposición y lograr así una adecuada desinfección.

Las ventajas de la desinfección mediante rayos ultravioleta estriban en que el tratamiento no produce olores y sabores desagradables, es completamente automático y exige un corto período de contacto.

Pasteurización

El más antiguo y mejor conocido método de desinfección es quizás el de calentar. La pasteurización, similar al proceso que se utiliza en la leche, desinfecta también con efectividad el agua potable. Los ensayos en plantas piloto del Centro de Ingeniería Sanitaria Robert A. Taft demuestran que el uso de un pasteurizador de flujo continuo resulta técnica y económicamente muy práctico para la desinfección de sistemas individuales o de otro tipo de abastecimiento de agua.

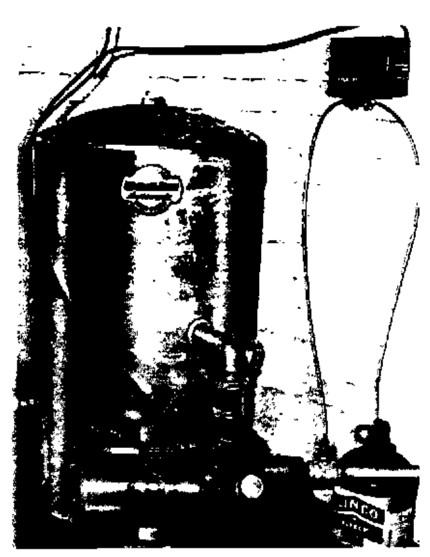


Fig. 329: Con este equipo se puede aplicar con efectividad la sobre-coloración en los sistemas individuales de abastecimiento de agua.
(Cortesía de Everpure, Inc.)

La desinfección se logra llevando el agua hasta una temperatura de 72°C y manteniéndola así por unos 15 segundos. Los resultados obtenidos en las pruebas indican que el proceso aniquila tanto a las bacterias patógenas como a otros microorganismos tales como los quistes de ameba, las lombrices y los virus que son más resistentes a la desinfección por cloro que las bacterias.

El costo de la pasteurización, a escala domiciliaria, es, según la experiencia obtenida en las unidades piloto, de alrededor de 26 centavos de dólar por cada metro cúbico. La cifra es alta si se la compara con el costo de la desinfección por vía química. La principal ventaja del método consiste en que éste es sencillo, digno de confianza y demanda muy poca o ninguna atención de parte del propietario de la casa.

Desinfección con Ozono

El ozono puede desinfectar el agua debido a su poderosa actividad oxidante. Este se usa en el tratamiento del agua en varios países de Europa. Su actividad proviene del hecho de que la molécula de ozono contiene tres átomos de oxígeno, en tanto que la de este último sólo tiene dos. El ozono es inestable, y al mezclarse con el agua pierde un átomo de oxígeno que es el que aniquila por oxidación a la bacteria.

El ozono puede producirse a un costo moderado mediante una descarga eléctrica de alto voltaje producida en aire seco, la cual transforma cierta parte del oxígeno en ozono. Se necesita mezclar vigorosamente el agua ya que la sustancia es sólo ligeramente soluble. Además de desinfectar, ésta reduce el color, los sabores y los olores que pudiesen hallarse presentes. Se sabe que el tratamiento con ozono cuesta alrededor de dos veces el que se efectúa con cloración.

La Desinfección en Regiones Tropicales

Las prácticas de cloración tal como se utilizan en los Estados Unidos y en Europa, no son enteramente adecuadas a la desinfección del agua en los países tropicales. Además de las enfermedades de origen hídrico que se manifiestan en los climas templados, las de las regiones tropicales incluyen disentería amebiana, lombrices y filariasis. Los portadores de estas enfermedades se encuentran en las fuentes de agua superficiales. Estos son más grandes que las bacterias y más difíciles de aniquilar mediante la aplicación de cloro. Las plantas de tratamiento de agua superficial de las regiones tropicales, deben dotarse de una combinación de etapas que destruya con eficacia a todos estos organismos.

Aireación del Agua

La aireación, el proceso que consiste en exponer el agua al contacto con el aire, produce dos resultados, a saber: el agua puede disolver cierta cantidad máxima de oxígeno y a su vez liberar otros gases que se encuentran en solución. Excepción hecha de la dureza del agua, cualquiera de los dos fenómenos puede contribuir a la remoción de algunas sustancias inconvenientes.

Los métodos de aireación comprenden la atomización o vaporización del agua en el aire, el dejarla fluir sobre cascadas escalonadas, el de permitirle entrar en contacto con lechos de coque o de piedra, o el de inyectarle burbujas de aire en su seno. El burbujeo de aire dentro del agua se puede lograr ya sea en un tanque abierto o en un sistema cerrado y sometido a presión.

La aireación en la atmósfera puede eliminar aquellos gases disueltos tales como el hidrógeno sulfurado, el metano (producto

de la degradación de la materia orgánica), el dióxido de carbono y el cloro.

Excepto por lo que se refiere al dióxido de carbono, la remoción por aireación de otros gases mejora el sabor y el olor del agua. La eliminación del dióxido de carbono y del hidrógeno sulfurado mediante la aireación, puede también reducir la corrosividad de aguas que contengan estos gases. Sin embargo, el beneficio logrado se desvirtúa en parte por el hecho de que el aumento en el contenido de oxígeno del agua aireada juega a su vez un papel importante en la corrosión.

La aireación se puede usar para eliminar el hierro y el manganeso, en cuyo caso el oxígeno se une químicamente para oxidar y precipitar los hidróxidos y óxidos de estos metales.

Remoción de Hierro y de Manganeso

El hierro es propenso a hallarse en todas las aguas, pero especialmente en las subterráneas. Si el manganeso se encuentra presente junto con el hierro, la remoción se vuelve más difícil.

La remoción del hierro y del manganeso forma parte algunas veces de una serie de tratamientos, pero cuando se trata de agua de pozo, es por lo general el único que se aplica al sistema, haya o no desinfección.

Todos los ácidos interfieren con la precipitación del hierro. Para lograr su remoción efectiva, cuando éste se halla en una agua ácida, debe agregarse una base para alcalinizarla antes de su filtración. La materia orgánica impide también a veces la precipitación del hierro.

Una aireación seguida de sedimentación y filtración elimina por lo general el hierro cuando no existe materia orgánica, tal como siempre sucede con el agua de pozo.

El permanganato de potasio o el cloro pueden utilizarse para oxidar el hierro, el que luego es retirado del agua por filtración. Este es el procedimiento que por lo general se emplea cuando el agua tiene un alto contenido de materia orgánica, como es el caso frecuente de las aguas de superficie.

El hierro y el manganeso se pueden eliminar haciendo pasar el agua a través de lechos de arena verde manganífera. Este material granular actúa tanto como oxidante de contacto que como medio filtrante mecánico. La arena verde manganífera se obtiene mediante el tratamiento de una zeolita natural (glauconita) con sulfato manganoso. Al lavar este material con permanganato de potasio, se produce la adherencia del oxígeno a la superficie de las partículas.

Cuando el agua que contiene hierro y manganeso se hace pasar a través de este lecho, el material de éste cede oxígeno para formar hidróxido de hierro y óxido de manganeso insolubles. A la vez que éstos precipitan en la solución, son también filtrados por las mismas partículas de la arena verde.

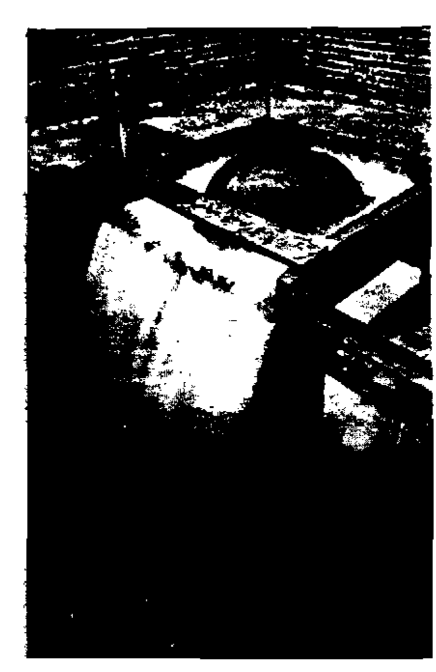


Fig. 330: La aireacion simple tiene lugar en esta cascada rebosante; el agua se bombea mediante inyección de aire.

Cuando se ha consumido todo el oxígeno disponible, se lava la arena verde de manganeso y se regenera con permanganato de potasio. Este proceso es análogo al de la regeneración de un suavizador de agua.

Un reciente perfeccionamiento de este procedimiento aplica una alimentación continua de permanganto de potasio al agua después de su contacto con la arena verde o catalizador de contacto. El permanganato mismo oxida al hierro y al manganeso, y los óxidos e hidróxidos insolubles, que resultan de ello, quedan retenidos en el lecho filtrante. Cualquier cantidad de hierro o de manganeso que no haya sido eliminada durante la acción anterior es oxidada dentro del lecho filtrante por el catalizador de contacto. El permanganato de potasio que no se haya utilizado durante la reacción inicial seguirá regenerando continuamente la arena verde. Se necesita efectuar un retrolavado periódico con agua tratada para eliminar sólidos, hidróxidos de hierro y óxido de manganeso retenidos por el filtro.

Carbón Activado

El carbón activado se usa ampliamente para la remoción de sabores, olores y color del agua. La remoción de éstos tiene lugar mediante una actividad física denominada adsorción. Cuando se van a tratar cantidades relativamente voluminosas de agua, el carbón activado se agrega en forma de polvo.

En la mayoría de las instalaciones que tratan agua de superficie, el carbón se agrega antes de, o durante la coagulación. Parte del polvo se elimina en la sedimentación y el resto es retenido por la filtración.

El carbón activado, en forma granular, se utiliza en un equipo idéntico a los filtros de arena bajo presión. Los filtros de carbón son particularmente adaptables a los sistemas industriales, instalaciones municipales pequeñas y sistemas domiciliarios de abastecimiento de agua. En la página 352 se describe su aplicación a la decloración.

Suavización del Agua Dura

El tratamiento del agua, encaminado a eliminar los minerales que causan la dureza, se denomina suavización. Los elementos causantes de la dureza son el calcio y el magnesio. Estos se hallan presentes en forma de compuestos tales como bicarbonatos, sulfatos o cloruros. Se utilizan

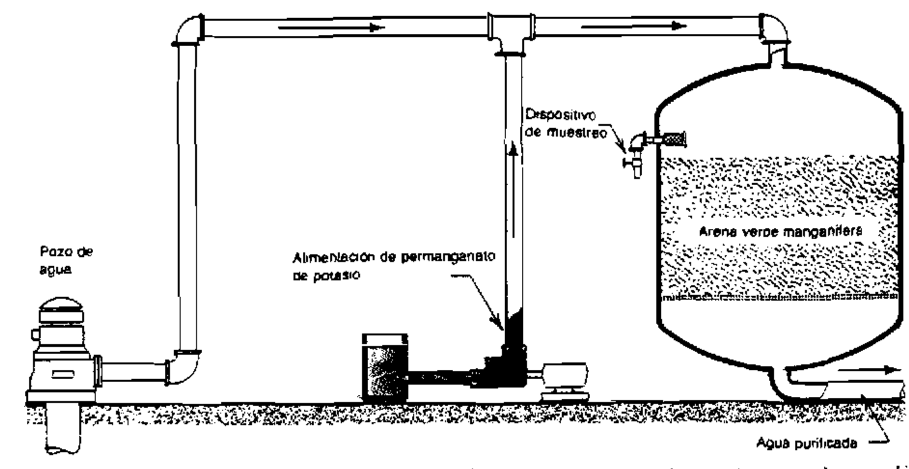


Fig. 331: Principio en que se basa el funcionamiento de un proceso regenerativo continuo para la remoción de hierro y de manganeso. (No se muestra el sistema de retrolavado).

(Cortesía de Hungerford & Terry, Inc.)

dos procedimientos para la remoción del calcio y del magnesio: el tratamiento a base de soda cáustica (carbonato de sodio) y el de filtración a través de lechos de zeolitas o de intercambio catódico.

Al agregar al agua dura cal y carbonato de sodio, se produce una reacción química que convierte la mayor parte de los compuestos disueltos de calcio y magnesio en carbonato de calcio e hidróxido de magnesio. Ambos, siendo insolubles, se precipitan de la solución conforme se van formando y se decantan durante el período de sedimentación. Después de éste, el agua es obligada a pasar a través de filtros rápidos de arena, para eliminar así cualquier material remanente que hubiese quedado en suspensión.

Las etapas de sedimentación seguidas de filtración son parecidas a las que se describieron al tratar de la remoción de turbiedad en las aguas de superficie. Las instalaciones que se necesitan son semejantes, dispositivos para mezclar los reactivos con el agua, tanques de sedimentación y filtros rápidos de arena.

Las unidades de contacto, o de flujo vertical ascendente, casi idénticas a las que se usan en la clarificación del agua turbia y que fueron descritas en la página 6 (de este capítulo), se emplean también para la suavización del agua. Una de las ventajas de operación de estas unidades, es la de que el agua dura entra inmediatamente en contacto con la lámina de carbonato de calcio y de hidróxido de magnesio que se ha formado con el agua previamente suavizada. Esto tiene lugar en el lodo en suspensión que flota en la porción inferior de la unidad. Como resultado de ello, se obtiene una reacción química más rápida de la cal y del carbonato de sodio agregados con el afluente de agua dura, lográndose que las unidades funcionen a razones relativamente altas.

En el procedimiento de cal y soda cáustica, se forman grandes cantidades de lodo, por lo que el destino que debe dársele a éste constituye un problema. Después de secarlo al aire, el lodo podría ser apilado o amontonado, pero ello resulta desagradable a la vista. Parte del lodo puede usarse con fines agrícolas para neutralizar desechos ácidos de los procesos industriales y como material de abultamiento en ciertos productos que requieren del carbonato de calcio pulverizado, para este propósito. Algunas instalaciones obtienen cal de la combustión del lodo, que luego utilizan de nuevo en el proceso de suavización. El gasto que implica la eliminación del lodo constituye un factor importante dentro del costo total de este método de suavización.

La suavización del agua por el método de la zeolita o intercambio catódico, se basa en la virtud de ciertos materiales granulares, denominados zeolitas, para intercambiar iones de su estructura con otros iones del agua. Cuando el agua dura se hace percolar a través de un lecho de zeolita al cual se hallan adheridos iones de sodio, tanto el calcio como el magnesio son intercambiados por el sodio, lográndose que el agua se torne suave. El calcio y el magnesio quedan entonces adheridos a los granos de la zeolita.

Por lo tanto, el agua suavizada contiene bicarbonato de sodio en lugar de bicarbonatos de calcio y magnesio. El tipo de materia mineral disuelta se transforma por el intercambio que tiene lugar, pero el contenido mineral total del agua permanece inalterado.

Cuando ya se ha agotado la capacidad permutadora del material de la zeolita, debe invertirse el proceso de intercambio catódico para así regenerarlo y restituir los iones de sodio. Para lograr esto, se hace pasar a través del lecho de zeolita una solución salina fuertemente concentrada (cloruro de sodio). El exceso de sodio de esta solución regeneradora hace que la zeolita ceda los iones de calcio y magnesio que se hayan acumulado y atrape una nueva carga de iones

de sodio. Cuando la solución de sal se evacúa, la zeolita se halla apta de nuevo para reiniciar su efecto suavizador.

El proceso que utiliza zeolita produce agua sin dureza. Este actúa con independencia casi absoluta de la dureza del agua cruda. La operación y la regeneración se logran en forma automáticamente cíclica.

La desaparición total de la dureza en el agua tratada, no siempre es lo mejor en los abastecimientos municipales. Parte de la dureza se preserva suavizando en forma parcial el abastecimiento mediante intercambio catódico y haciendo una mezcla con la cantidad adecuada de agua no suavizada, para obtener las características que se desean al enviar el líquido al sistema de distribución.

El proceso de la zeolita se define correctamente como un *intercambio iónico*. El intercambio iónico no sólo resulta útil como proceso de suavización, sino que también puede emplearse para producir otras transformaciones del contenido mineral disuelto del agua.

El producir un intercambio iónico, constituye una propiedad natural de ciertos minerales de la clase de las zeolitas. La arena verde o glauconita, que se encuentra en New Jersey, se ha venido usando ampliamente para la suavización, a partir de 1920. En 1935 se desarrollaron los glóbulos de resina sintética con propiedades de intercambio iónico, y este material se utiliza hoy día en casi todos los procesos que se basan en ese principio. La resina posee casi el doble de la capacidad de intercambio que tiene la arena verde, amén de otras características favorables.

Ionización de los Minerales Disueltos

En los procesos de intercambio iónico, sólo intervienen aquellos compuestos que se ionizan en el agua. El azúcar, por ejemplo, no se separa en iones.

Los ácidos minerales, las bases y las sales, se ionizan o disocian, hasta el máximo de su solubilidad. El ejemplo más común lo constituye el cloruro de sodio, o sal común. Esta se halla compuesta por un átomo de sodio unido a un átomo de cloro y se describe por el símbolo NaCl. Cuando esta sal se encuentra disuelta en agua, se separa o disocia en iones de sodio ($Na+$) que contienen una carga eléctrica positiva, y en iones de cloro ($Cl-$) con carga negativa. Las sales tales como el bicarbonato de calcio ($CaHCO_3$) se ionizan en forma similar y tienden a disociarse en iones de calcio positivamente cargados ($Ca++$) e iones de bicarbonato negativos (HCO_3-). Aquellos iones que se hallan cargados positivamente, se denominan cationes; los que contienen cargas eléctricas negativas, se llaman aniones.

En los capítulos 4 y 16, se dieron otras explicaciones de cómo los minerales disueltos se ionizan en el agua, y en qué forma afectan los iones las propiedades de esta última.

El intercambio iónico no sólo se utiliza para transformar una sal disuelta en otra, como es el caso en la suavización del agua, sino que también puede aprovecharse para extraer todos los minerales disueltos y producir así una agua casi pura. El grado de pureza así obtenido, es mayor que el del agua destilada.

La *desmineralización* es el resultado de hacer pasar el agua a través de lechos de dos tipos completamente diferentes de resinas permutadoras de iones. El contacto con un tipo de resina elimina todos los iones metálicos, calcio, magnesio, sodio, hierro, manganeso y también algunos otros. Estos son los iones positivamente cargados, o sea, los cationes. Esta fase del proceso se denomina *intercambio catódico*, y a menudo se lleva a cabo en una unidad o tanque separado, que recibe el nombre de *permutador de cationes*.

Una vez que los iones metálicos han sido

eliminados, el agua es puesta en contacto con otro tipo de resina permutadora de iones, la que a su vez elimina los iones de carga negativa, tales como cloruros, bicarbonatos, sulfatos y otros similares. Esta segunda etapa se verifica en una unidad también separada conocida como, *permutador de aniones*, completándose así la labor de desmineralización.

Como en cualquier suavizador ordinario de agua, los materiales que ostentan las propiedades de intercambio iónico deben ser regenerados cada vez que su capacidad permutadora se agota. La resina empleada para el intercambio de cationes se regenera con ácido, por lo general, sulfúrico. La que produce el intercambio de aniones, se puede regenerar con alguna base, usualmente hidróxido de sodio. Las resinas sintéticas permutadoras de iones pueden ser regeneradas con un ácido o con una base, por tiempo indefinido.

Uno de los efectos que se producen por la remoción del hierro en el permutador de cationes es el de la formación de una cantidad considerable de dióxido de carbono. Ahora bien, para eliminar el dióxido de carbono, se suele instalar un desgasificador en un punto posterior al permutador de cationes y antes del de aniones, reduciéndose de este modo la carga impuesta a la segunda unidad.

En lugar de dos unidades separadas, los dos tipos de glóbulos de resina pueden mezclarse e introducirse en un solo tanque.

Esta disposición podría considerarse como una unidad de lechos y proceso mixtos. Cada par de los dos tipos de glóbulos de resina se comporta como un permutador doble. Durante la operación normal, el agua desciende en la forma usual a través del lecho mixto, y es retirada del fondo del tanque por el sistema de recolección.

Para lograr una regeneración por aparte de los dos materiales, los gránulos mezclados deben separarse en dos capas diferentes, cada una constituida por una sola clase de resina. Todo el material correspondiente a un tipo es arrastrado hacia la mitad superior del tanque, quedando el segundo tipo en la mitad inferior. Mediante un dispositivo de distribución situado en medio del tanque, se hace fluir ácido a través del lecho permutador de cationes, en una dirección, en tanto que a su vez, y en sentido opuesto, se fuerza una base a que pase a través del lecho de aniones. Después de la regeneración, los materiales se enjuagan con agua pura y mediante agitación producida con aire comprimido, se entremezclan completamente para que la unidad pueda reasumir su funcionamiento.



Fig. 332: Un novísimo suavizador de agua por intercambio iónico, que se caracteriza por una circulación y regeneración continuas. Se utilizan Rejillas Johnson como elementos retenedores de la resina. *(Cortesía de Chemical Separations Corp.)*

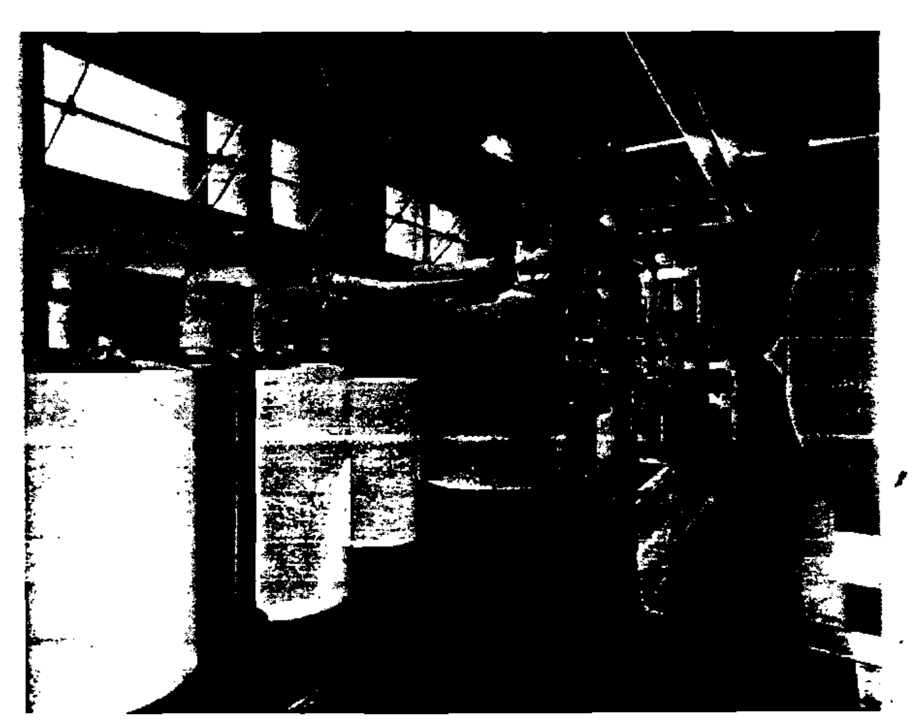


Fig. 333: Tratamiento de agua de pozo en una escuela de Birminghan, Michigan, que hace uso de suavizadores de intercambio iónico (izquierda) y filtros de presión para la remoción de hierro (parte posterior derecha). *(Cortesía de The Permutit Co.)*

En diversos tipos de desmineralizadores se emplean Rejillas Johnson de diámetro pequeño, como elementos que forman parte de la disposición del distribuidor de regeneradores químicos, y como accesorios para retener la resina tanto en la abertura de entrada como en la de salida, de los tanques.

Desalación de Aguas de Mar y Salobres

En ciertos acuíferos extensos de diversas localidades y a determinada profundidad, se manifiestan aguas subterráneas salobres de moderada salinidad. Aunque la conversión del agua del mar en agua dulce se halla aún muy discutida y es objeto de una intensa experimentación, pareciera que el campo de aplicación más inmediato y factible para los métodos que se están ensayando, es el de la desalación de las aguas subterráneas que se hallan mineralizadas.

La desalación equivale a una desmineralización tal que los minerales disueltos son reducidos a una cantidad por debajo de las 1.000 ppm, y preferiblemente, a menos de 500. Esto si nos regimos por las especificaciones de agua potable del Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos clasifica como sigue el grado de salinidad de las aguas mineralizadas:

Sólidos Disueltos ppm	Classificacion
1.000 a 3.000	Ligeramente salina
3.000 a 10.000	Moderadamente salina
10.000 a 35.000	Muy salina
Más de 35.000	Salmuera

El agua del mar contiene en promedio alrededor de 35.000 ppm. de sólidos disueltos. La salmuera es una agua salina que contiene una concentración mayor que ésta.

El agua ligeramente salina se usa a diario tanto en sistemas públicos como individuales de abastecimiento, a falta de otra de mejor calidad. En los Estados Unidos y Canadá, se utiliza para el abastecimiento de más de 1,000 sistemas municipales, agua cruda cuyo contenido de sólidos disueltos anda en el orden de 1.000 a 3.000 ppm. Por lo menos 100 de estos servicios utilizan agua que contiene más de 2.000 ppm de sólidos disueltos; unos pocos más se sirven de agua que se halla en el rango moderado de algo más de 3.000 ppm.

Desalación Mediante Intercambio Iónico

A algunas aguas salobres se puede aplicar el proceso de intercambio iónico, antes descrito, para su desmineralización. Los costos resultan muy elevados para las aguas que contengan más de 2.500 ppm. de sólidos disueltos. Sin embargo, si se parte de un abastecimiento que contenga 2.000 ppm de sólidos disueltos, el agua tratada resultante, con un contenido de 500 ppm, equivaldría a una mezcla constituida por 3 partes de agua completamente desmineralizada y una parte de agua cruda.

Los estudios realizados por el Laboratorio de Investigaciones de Ingeniería Sanitaria de Richmond, Cal., indican que para ciertos tipos de agua, el proceso de intercambio iónico puede resultar más económico que ciertos otros métodos. El costo total de reducir los sólidos disueltos desde 2.500 a 500 ppm., en una instalación que produzca 380.000 litros por día podría ser de alrededor de 26 centavos de dólar por metro cúbico. Si el contenido de sólidos disueltos de agua cruda es del orden de 2,000 ppm., se pregona que el costo puede ser de unos 21 centavos de dólar por cada metro cúbico.

Desalación por Destilación

En el uso corriente que se le da al término, desmineralización se utiliza por lo general para referirse a un proceso mixto de intercambio de cationes y aniones para el tratamiento del agua. Sin embargo, con la destilación también se logra desmineralizar el agua y es un proceso de conversión del agua salada, que se ha usado durante muchos años para el abastecimiento de pequeñas cantidades de agua dulce a las embarcaciones.

Actualmente se hallan en progreso los ensayos prácticos y el uso rutinario de varios procesos de destilación. El objetivo que se persigue con las instalaciones experimentales es el de desarrollar unidades altamente eficientes, que puedan desalar el agua en cantidades y costo que hagan posible el uso intensivo de los recursos de agua salada.

Los métodos de destilación comprenden: evaporación de efecto múltiple, destilación por compresión del vapor, destilación instantánea, destilación vertical en un tubo largo, evaporación mediante la transferencia de calor de un líquido inmiscible, y evaporación en alambiques solares.

La formación de costras en las superficies metálicas recalentadas constituye una de los mayores entrabamientos de las unidades destiladoras y aumenta el costo del proceso. Se está probando con la transferencia de calor de líquido a líquido, para la cual el agua salada se calienta mediante el contacto directo con un líquido caliente que no se mezcla. Se espera que de este modo se reduzca el problema de la formación de costras y que el procedimiento permita el uso de temperaturas mayores, las que a su vez reduzcan el costo de la energía necesaria para producir la evaporación.

En Roswell, Nuevo México, se ha construído una planta para desalar agua subterránea altamente salina, que consta de dos etapas para comprimir el vapor. La

investigación está patrocinada por el programa federal de conversión de agua salada. Las instalaciones fueron diseñadas para que produjeran 3.785.000 litros de agua dulce por día. El agua de pozo que se trata en esta instalación, contiene más de 24.000 ppm de sólidos disueltos y tiene una dureza de algo más de 3.000 ppm. Los inconvenientes relacionados con el pretratamiento del agua cruda, para evitar la formación de costras, han causado en esta planta muchos problemas.

Procesos de Electrodiálisis

El *proceso de electrodiálisis*, que es un método electrolítico, se encuentra en operación en varios lugares, para desalar el agua salobre que se obtiene por bombeo de pozos.

En este procedimiento, se hace pasar a través del agua, una corriente eléctrica, por dentro de una cámara que contiene dos membranas plásticas especiales. Estas membranas dividen la cámara en tres compartimientos. Una de ellas permite que sólo los iones negativamente cargados, tales como los de cloruro o sulfato, pasen a través. La otra membrana sólo deja pasar los iones de carga positiva, como son el sodio o el calcio.

El electrodo positivo, colocado por detrás de una de las membranas, atrae los iones negativos que pasan a través y concentran el flujo alrededor del electrodo. La membrana a su vez evita la recirculación de esta agua. De manera análoga, los iones positivos son atraídos por el electrodo negativo colocado por detrás de la otra membrana selectiva de iones, que sólo deja pasar los positivos. El resultado que se obtiene de este modo es el de que el agua contenida entre las dos membranas se desmineraliza en un alto grado y la que se localiza alrededor de los electrodos y por detrás de las membranas se vuelve una salmuera como consecuencia de la acumulación de los minerales en esa parte de la celda. Esta salmuera es arrastrada continuamente y eliminada. El agua potabilizada que queda entre las membranas es conducida por tubería hasta su lugar de consumo.



Fig. 334: Prueba de un pozo de 30 cm. de diámetro en Webster, Dakota del Sur, a 131 m^3/h. El pozo tiene una profundidad de 68 m., y se encuentra acondicionado con una rejilla Johnson de 10 m. de largo, emplazada en un acuífero de arena. El agua salobre es desalada mediante el proceso de electrodiálisis.

En Webster, Dakota del Sur, se utiliza el proceso de electrodiálisis para tratar el abastecimiento municipal de agua. La instalación constituye un proyecto de demostración y fue construida en 1961 por la Oficina de Agua Salada del Departamento del Interior de los Estados Unidos.

El agua subterránea de la localidad se obtiene de un acuífero de arena que se encuentra a una profundidad de unos 76 m. El líquido contiene alrededor de 1.500 ppm de sólidos disueltos y unas 900 ppm de dureza. El contenido de sulfato se halla por encima de 700 ppm

El contenido mineral del agua se reduce a algo menos de 500 ppm. La instalación se diseño originalmente para producir hasta unos 945.000 litros de agua diarios, pero esta capacidad se aumentó hasta 1.190.000 litros por día. El consumo promedio de la problación es de unos 570.000 litros diarios. El costo que se está obteniendo con el tratamiento es del orden de 31 centavos de dólar por cada metro cúbico de agua.

Otras instalaciones que utilizan el proceso de electrodiálisis para el servicio de abastecimiento municipal de agua, se encuentran en Coalinga, Cal. y en Buckeye, Arizona. La planta instalada en Buckeye, convierte agua de pozo con un contenido de alrededor de 2,100 ppm de sólidos disueltos, a un costo de aproximadamente 17 centavos de dólar por cada metro cúbico. Esta instalación fue diseñada para una producción pico de 2.400.000 litros diarios, pero su utilización media a través del año no excede de unos 756.000 litros por día.

Al comparar este costo con el de Dakota del Sur, se pone de relieve el efecto que ejerce el tipo de minerales disueltos sobre el costo del proceso de electrodiálisis. El contenido mineral del agua de Arizona consiste mayormente en sodio y cloruros, en tanto que el de Dakota del Sur es alto en calcio, magnesio y sulfato, con algo de hierro y manganeso.

En ciertos lugares situados tierra adentro, el destino que deba dársele a los desechos de salmuera, producto de una instalación desmineralizadora, puede constituir un problema y ser costoso. El distribuirla en el terreno, con lo que la salmuera podría contaminar el agua subterránea natural, puede ser tan objetable como descargarla en un río. En las localidades en donde se necesita aplicar la desalación, los ríos u otras corrientes superficiales son muy pequeños o no existen del todo.

Los desechos de una planta de electrodiálisis varían por lo general desde un 20 a un 50 por ciento del volumen de agua que se esté tratando. El volumen correspondiente a una instalación de intercambio iónico es mucho menor, pero el tonelaje de sólidos disueltos es, cuando menos, el mismo.

Uno de los problemas del proyecto de conversión de agua salobre de Webster, Dakota del Sur, es el de la eliminación de la salmuera residual. El volumen de ésta puede alcanzar hasta unos 264.000 litros por día. Las lagunas de evaporación podrían ser la solución, pero éstas necesitan áreas muy extensas.

En Buckeye, Arizona, los desechos se descargan a un río, conjuntamente con el efluente de la planta de tratamiento de aguas negras de la ciudad. Estos desechos combinados, se usan posteriormente para riego en áreas alejadas.

Procesos de Congelación

La desalación mediante la congelación y eliminación de cristales de hielo provenientes de salmuera no congelada tiene su origen en un concepto muy sencillo. Se están probando actualmente dos métodos.

En uno de éstos, el agua del mar se hace pasar a una cámara de alto vacío. En el vacío, parte del agua se evapora, lo que causa el enfriamiento de la que queda, hasta alcanzar una temperatura suficientemente baja como para que se formen cristales congelados de agua dulce. El vapor, que se

encuentra libre de sal, es condensado y recuperado, en forma de agua dulce, además del hielo.

Otro método denominado proceso refrigerante directo, forma cristales de hielo del agua dulce, mediante la evaporación de un refrigerante tal como el isobutano, directamente dentro del agua del mar.

En ambos métodos, la mezcla de hierro y salmuera es retirada y obligada a pasar a través de un depurador, en donde los cristales de hielo se lavan para eliminar la sal y la salmuera. Seguidamente la salmuera se retira, y el hielo se derrite.

El problema más complicado que se presenta con el empleo de estos métodos es el de separar de la salmuera los cristales. Debe utilizarse agua dulce para la depuración, la cual vuelve a mezclarse con la salmuera. Esto viene a reducir la producción neta de agua desalada.

En Eilat, Israel, se encuentra en operación una planta de congelación al vacío, que está en capacidad de producir alrededor de 910.000 litros de agua diarios, de un contenido aproximado de 300 ppm de sólidos disueltos. La alimentación de agua cruda se obtiene de una serie de pozos de profundidad somera emplazados en una playa del Mar Rojo. El agua de mar experimenta una filtración natural conforme se desplaza hacia los pozos a través de la arena de la playa, de manera que puede introducirse directamente a la unidad desaladora. El agua de los pozos contiene alrededor de 38.000 ppm de sólidos disueltos.

Osmosis Invertida

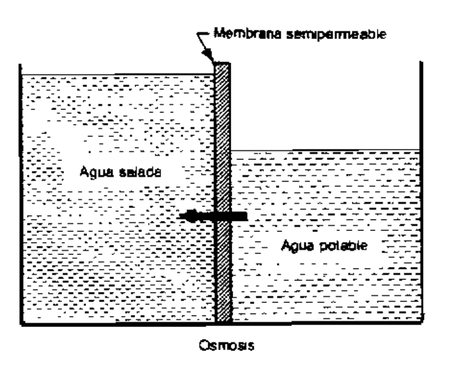
El proceso denominado *ósmosis invertida* se proclama como el más sencillo de todos los métodos para desalar, si se puede lograr que funcione en forma digna de confianza.

Si en lados opuestos de una membrana semipermeable se colocan agua salada y pura, esta última se desplazará a través de la membrana hacia el agua salada, sin que se necesite aplicar ninguna fuerza externa. Este fenómeno se conoce como ósmosis. La humedad del suelo pasa a las raíces de las plantas mediante acción osmótica; los líquidos que el cuerpo humano utiliza entran al torrente sanguíneo mediante ósmosis.

Sin embargo, el flujo a través de una membrana que se encuentre separando agua salada de agua dulce puede invertirse si se aplica una presión hidrostática en el lado del agua salada. El resultado que se obtiene con esto es el de una inversión de la ósmosis.

Si la membrana tiene las características adecuadas, la sal no pasará a través de ella, de modo que el agua forzada a desplazarse hacia el agua dulce queda desalada.

Por millones de años, los peces de agua salada han venido desalando ésta para sus propias necesidades, mediante el uso de este principio. El éxito para lograr esto en una



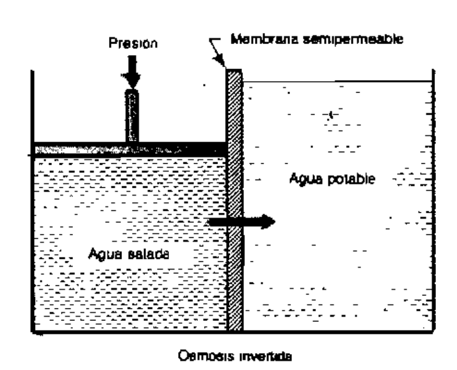


Fig. 335: Comparación esquemática de los principios de la ósmosis y de la ósmosis invertida.

escala útil dependerá del desarrollo de membranas adecuadas.

Las membranas que se utilizan en las instalaciones experimentales, sólo duran un corto tiempo. Los costos son relativamente altos debido a la necesidad de reemplazarlas frecuentemente.

La planta piloto de Coalinga, Cal., produce 18,900 litros de agua potable cada día, mediante el proceso de inversión osmótica. El agua cruda es salobre con un contenido de sólidos disueltos del orden de 2,500 ppm. La ciudad hace uso tanto de la producción de la instalación de inversión osmótica como de la de electrodiálisis, para satisfacer sus necesidades de agua potable. La Universidad de California tiene a su cargo el ensayo y la operación de la unidad de ósmosis invertida. Después de un año de lograr éxito en la operación, la instalación fue ampliada.

Referencias

1. STEEL, Ernest W., "Water Supply and Sewage." Third Edition (1953). McGraw-Hill Book Company, New York.
2. "An Outline of Modern Water Treatment Equipment" (1958). Pfaudler-Permutit, Inc., Paramus, N.J.
3. FAIR, G. M., and GEYER, J. C. "Water Supply and Waste-Water Disposal." (1956). John Wiley & Sons, Inc., New York
4. "Betz Handbook of Industrial Water Conditioning." 5th Edition (1957). Betz Laboratories, Inc., Philadelphia.
5. HUBBELL, J. W., "Iron Removal Facilities at Marshal, Michigan." pp 591-594, Vol. 58, No. 5 (1966). Journal American Water Works Assn., New York
6. "Saline Water Conversion Report for 1964." (1965). U.S. Dept. of Interior, Washington.

Capítulo 19

Especificaciones Para Pozos de Agua

CUALQUIER ACUERDO a que llegare un perforador de pozos para ejecutar un trabajo, remunerado en cierta forma por el propietario, constituye un contrato. Las condiciones y alcances del convenio pueden variar en infinidad de formas, desde un simple acuerdo verbal, hasta uno escrito en cualquier papel, o también puede establecerse con lujo de detalles en un documento de varias páginas ratificado por ambas partes en presencia de testigos. Burdo o formal, el arreglo a que se llegue constituye un contrato, mediante el cual quedan garantizados los intereses de ambos, contratista y propietario.

En los contratos de construcción, las especificaciones constituyen la definición de los pormenores: una descripción detallada de las dimensiones, materiales, ciertas condiciones generales, y algunos otros detalles. Los planos de la obra vienen a ser las especificaciones gráficas.

Muchos de los detalles que se especifican en otras obras de construcción podrían aplicarse también a los pozos. Sin embargo, debe darse una especial atención a algunas diferencias importantes que existen.

Cada pozo o grupo de pozos puede considerarse como un caso especial, aunque las condiciones del subsuelo de diferentes ubicaciones pudieran parecer semejantes. En segundo lugar, gran parte de la estructura del pozo no puede inspeccionarse visualmente, ni durante la perforación ni después de la conclusión del pozo. Una tercera diferencia consiste en que el propietario del pozo no se halla familiarizado con los métodos de construcción, especialmente con la destreza y tecnología necesarias para lograr éxito en la perforación.

Las especificaciones para la construcción de un pozo de agua constituyen la base para invitar a contratistas calificados a proponer sus ofertas. Cuando se han preparado adecuadamente, las especificaciones de la obra le permiten al contratista calcular razonablemente sus costos. Esto promueve una competencia imparcial y atrae propuestas razonables.

El contratista que hace una propuesta para la construcción de una obra confía con todo derecho en los planos y en las especificaciones que han sido sometidos a su

consideración, con el propósito de que haga una oferta. Los derechos de las partes se establecen mediante estos documentos, cuando se da fin al contrato de cierta obra.

La mayor parte de las leyes que rigen la inversión de fondos públicos exigen que las especificaciones permitan una libre y abierta competencia entre los licitantes responsables. Por lo general, se procura que las especificaciones no sean indebidamente restrictivas y que los contratos se adjudiquen teniendo en cuenta los altos intereses de cualquier dependencia gubernamental involucrada.

La Propuesta Responsable de Menor Valor

La interpretación de estas regulaciones demanda un buen juicio de parte de los funcionarios públicos. En la mayor parte de los casos, la ley exige que la adjudicación sea para aquel proponente *responsable* que haga la propuesta de menor costo, pero la práctica establecida de otorgar la construcción de pozos al licitante que ofrece sencillamente el menor costo, se ha hecho muy común. Esto posiblemente se debe a la creencia de que cualquier contratista puede otorgar el bono de cumplimiento y, que de este modo, es capaz de llenar todos los requisitos del contrato. El otorgar un contrato al proponente de menor costo exime a los funcionarios públicos de tener que juzgar la capacidad de los que han participado en la licitación, y es una práctica que siguen muchas dependencias, tanto municipales como estatales y federales.

Si el proponente de menor costo no se halla en capacidad de cumplir con todos los requisitos del contrato, la experiencia ha demostrado una y mil veces, que el público nunca llega a obtener mayores ventajas con el dinero que invierte, ni el menor costo a largo plazo.

Como guía para determinar cuál es el proponente que ofrece la mejor oferta responsable, el National Institute of Municipal Law Officers recomienda que se tomen en cuenta cinco factores, a saber: capacidad y preparación del licitante para ejecutar el contrato; idoneidad para realizar el trabajo en el tiempo estipulado, solvencia económica: estar el proponente en condiciones de ofrecer un mantenimiento futuro y de dar servicio, abundancia y alcances de las condiciones ofrecidas en la propuesta; y un precio favorable.

Teniendo todas estas cosas en mente, el que redacta las especificaciones debe plantear los requisitos en términos tales, que permitan obtener un trabajo de calidad a un costo razonable. Los ingenieros que conocen de los aspectos técnicos del diseño de pozos y del desarrollo de las aguas subterráneas, proceden según este criterio.

Aún no se ha llegado a redactar las especificaciones perfectas de cualquier trabajo de construcción. Se presenta así el interrogante, de quién será el responsable cuando no se obtienen los resultados que se desean.

Como regla general, pareciera que los ingenieros y arquitectos no son los responsables de los defectos de construcción cuando ellos han ejercido la habilidad y el cuidado necesarios en su trabajo. Sin embargo, algunos estados tienen leyes que establecen que los ingenieros y los arquitectos, implícitamente, están garantizando que los planos y especificaciones que ellos han preparado, permiten obtener los resultados apetecidos.

Los siguientes pronunciamientos se han tomado del fallo de una corte de Carolina del Sur:[3]

"Pareciera estar bien establecido que cuando una persona se ofrece como elemento calificado para realizar un trabajo de carácter particular, está garantizando implícitamente, que la labor que va a tomar bajo su responsabilidad se ejecutará con la mano de obra adecuada y se ajustará razonablemente al propósito a que se destine. Si una de las partes suministra a un contratista los planos y especificaciones necesarios para que éste ejecute una obra de construcción, implícitamente le está garantizando que dichos documentos son adecuados para obtener el resultado que se busca. Estos principios se han venido aplicando a los contratos de construcción."

Responsabilidad por Planos Defectuosos

Como corolario de esta regla, bien podría decirse que un contratista no es responsable, por lo general, por los defectos que pudiesen provenir de especificaciones defectuosas. El contratista que haya realizado su trabajo de acuerdo con los planos y especificaciones ha cumplido con su contrato. Los defectos que pudieran aparecer, como resultado de planos y especificaciones defectuosos, son responsabilidad exclusiva de la parte que ha preparado éstos.

Una decisión de la Suprema Corte de los Estados Unidos, ha puesto lo anterior en los siguientes términos:[2]

". . . si un contratista está obligado a construir, sujeto a los planos y especificaciones preparados por el propietario, no será responsable por las consecuencias que pudieren surgir como resultado de defectos en esos planos y especificaciones. En ningún momento quedará el propietario eximido de esa responsabilidad, por las cláusulas que exigen a los contratistas visitar la obra, verificar los planos, e informarse de los requisitos exigidos."

Muy diferente será la situación, si el contratista expresamente conviene en que los planos y las especificaciones permitirán obtener los resultados deseados, y que éstos se hallan libres de defectos. En casi todos los estados, las decisiones judiciales han venido sosteniendo que en tales casos, el contratista asume el riesgo de lograr los resultados que se buscan.

Responsabilidad del Diseñador

Una Corte de Mississippi ha definido de la siguiente manera la responsabilidad que cabe por los resultados finales que se obtengan en un contrato de construcción:

"Si ha existido una garantía implícita de idoneidad, ésta corresponde a la parte que preparó los planos y especificaciones, puesto que ello ha sido su trabajo. Al atraer propuestas para lograr un resultado específico ajustándose a esos documentos, puede decirse imparcialmente que éstos garantizan que ese resultado va a lograrse.

"Si yo estoy de acuerdo en lograr un cierto resultado siguiendo mi propio proyecto, implícitamente estoy garantizando que éste es satisfactorio; pero, si convengo en obtener ese resultado ajustándome estrictamente al proyecto preparado por otro, es este último el que implícitamente lo está garantizando. La responsabilidad que sobre la parte autora del proyecto, quien lo presenta a la otra con la apariencia implícita de ser suficiente para lograr el propósito que se pretende."

Pareciera que reglamentaciones como éstas se pueden aplicar para establecer el grado de responsabilidad que le corresponde a un contratista en relación con la cantidad y calidad del agua que pretende obtener de un pozo. Hasta dónde esta garantía podría ser válida es algo que depende de la redacción del contrato y de la decisión del propietario de incluir en sus especificaciones los requisitos de garantía.

Una Corte de Minnesota estableció la siguiente jurisprudencia:[4]

"Cuando un contratista celebra un contrato categórico e incondicional para construir un edificio o cumplir con cierto compromiso, es regla general y quizá universal, que él asume los riesgos inherentes al cumplimiento del contrato, y deberá entonces reparar o responder por cualquier daño o defecto que se presente antes de que la obra terminada haya sido entregada a la otra parte.

"Mas, cuando el contrato se realiza con ajuste a planos y especificaciones aceptados, no puede aplicarse el concepto anterior."

Una Corte de Nueva York ha establecido una jurisprudencia[5] más explícita, a la cual se ha hecho referencia en otros casos. El juicio provino de una disputa originada en la cláusula de garantía de un contrato de construcción.

El contratista convino en construir en condiciones impermeables el sótano de un edificio. El municipio de la ciudad fue el que redactó las especificaciones. El contrato le exigía al contratista el otorgar la garantía de que el sótano debería ser a prueba de agua y de humedad durante cinco años. Cualquier defecto en este aspecto debería ser reparado a expensas suyas sin que ello implicara costo alguno para la municipalidad.

El trabajo fue inspeccionado conforme se ejecutaba, y una vez terminado, el sótano se encontraba seco. Poco más tarde comenzó a manifestarse cierta humedad y el municipio retuvo el pago al contratista. El contratista, entonces, entabló juicio para recuperar su dinero. El demostró a la Corte que había suministrado los materiales y realizado el trabajo de acuerdo con las especificaciones. Además, argumentó que la garantía no podía ser cumplida con las especificaciones que regían su trabajo. La Corte estuvo de acuerdo con el contratista, y se pronunció de la siguiente manera.

"El acuerdo no consiste en ejecutar simplemente una labor, sino en realizar ésta de cierta manera y en utilizar los materiales especificados ajustándose al proyecto elaborado por la municipalidad, el cual constituye la única guía. La promesa hecha no fue sencillamente la de construir algo impermeable, sino hacerla a prueba de agua siguiendo los planos y especificaciones preparados por el Municipio de la ciudad, por lo que el contratista no tenía derecho a apartarse . . ."

Garantías de los Pozos

De los casos anteriores, se deduce que cuando el trabajo ha de ejecutarse de acuerdo con las especificaciones del propietario, el dar una garantía de rendimiento de un contrato de construcción de pozo, no tiene casi sentido. Sin embargo, algunas veces las cortes deciden que la inclusión de una claúsula de garantía significa que el contratista garantiza los resultados y se hace responsable si aquélla no se cumple, aunque haya seguido los planos y especificaciones al pie de la letra. Estas decisiones ocasionales que han ido contra la regla general, han movido a los abogados a advertir a los contratistas de pozos, que no garanticen el agua ni en cantidad ni en calidad.

Sin embargo, continúa siendo muy corriente que los contratistas garanticen el rendimiento de un pozo. Son pocos los contratistas, no obstante, que se ven obligados a ir a la Corte. La razón de esto, puede quizá deberse al hecho siguiente.

Limitaciones de Garantía de Rendimiento

Aunque muchos contratos de construcción de pozos, que incluyen esta cláusula, pareciera que garantizan la producción de una cierta cantidad de agua, en realidad no lo hacen en forma absoluta. La mayor parte de tales contratos logran el efecto de estipular un precio por la cantidad que se pretende garantizar, el que viene a ser una base de referencia para negociar un arreglo a un precio inferior, si la cantidad de agua obtenida resulta ser menor que la que se dijo.

Pareciera que esto no tiene nada de inconveniente, excepto cuando el contratista alega que la garantía ofrecida por él es absoluta, siendo en realidad que podría no ser así. Ni el contratista ni el propietario del pozo pueden luchar contra la naturaleza. Si el pozo produce la cantidad de agua que el acuífero está en capacidad de ceder, el propietario debería pagar por el agua que obtenga, aunque sea menos que la cantidad mencionada.

El siguiente extracto de unas especificaciones de pozos preparadas hace varios años para un pueblo[6] del Medio Oeste, describe un enfoque satisfactorio de la propuesta que otorga garantía de rendimiento.

"Al desarrollar un servicio de abastecimiento de agua, siempre podría suceder que ésta no se obtenga en la cantidad necesaria en los sitios en que se van a emplazar los pozos. Si después de ejecutada la perforación exploratoria, el contratista notifica a la otra parte que no se han descubierto formaciones acuíferas adecuadas, y que aparentemente resulta imposible obtener la cantidad garantizada de agua, el propietario aceptará y pagará según la capacidad producida, sobre una base proporcional, o cancelará el contrato pagando únicamente el costo de los pozos de exploración sin más responsabilidad de ambas partes. El contratista queda facultado para recuperar todo su material y equipos, incluyendo los que hubiesen sido instalados."

En otro contrato de construcción de pozo, el preámbulo del acuerdo fue puesto en los siguientes términos:

"Considerando que el propietario necesita un abastecimiento de agua de pozo en la cantidad y calidad que se pueda obtener de las formaciones geológicas con un esfuerzo razonable; considerando que el contratista tiene experiencia en el desarrollo de aguas subterráneas y que cuenta con personal técnico, cuadrillas adiestradas y equipo adecuado como para construir pozos eficientes en los acuíferos que pudiesen existir, se conviene lo siguiente entre las partes . . ."

Este preámbulo, que claramente establece los deseos e intenciones de las partes, fija las bases de un acuerdo equitativo. Las especificaciones y otros términos del contrato que pueden desenvolverse en forma lógica dentro del marco de esta filosofía, serán justos para ambas partes, puesto que éstas reconocen las inevitables limitaciones que las condiciones geológicas imponen a los resultados que puedan obtener en la práctica. Ambas partes deberán tener presente estas circunstancias.

La Garantía por Sí Sola No Crea Agua

En contraste, la siguiente sugestión que aparece en las especificaciones para pozos profundos, de la American Water Works Association[9] en lo referente a los contratos que garantizan rendimiento, dejan una falsa impresión. El párrafo correspondiente dice así:

"Si el propietario considera que no es oportuno proseguir con la construcción del pozo, a menos de que él esté seguro de que se va a obtener la cantidad y calidad de agua que se desea, puede utilizarse la propuesta que garantiza rendimiento, aunque a sabiendas de que el pozo que se adquiera con este procedimiento podría costar más."

El punto débil de esto es que sea cual fuere lo que el contratista garantiza, el propietario solamente obtiene aquella cantidad y calidad de agua que se encuentre disponible en el acuífero, en los sitios de su propiedad escogidos para construir en ellos los pozos. El contratista experimentado y el ingeniero competente que representa a su cliente, lograrán obtener una estructura de pozo tal que permita extraer el agua de que se disponga, no importa cuál cifra haya sido escrita anteriormente en el papel, como garantía.

Responsabilidad en Cuanto a las Condiciones del Sitio

Una provisión verdaderamente injusta que se incluye en muchas especificaciones preparadas por dependencias públicas, es aquélla que pretende sentar toda la responsabilidad por el reconocimiento de las condiciones del subsuelo, en el contratista. En la mayoría de los casos, el tiempo y el costo le impiden a un contratista de perforación de pozos ejecutar su propia perforación exploratoria antes de licitar. Por lo general, el propietario no autoriza el

acceso a su predio para que todos los licitantes pudieran realizar agujeros de prueba por doquier.

Los ingenieros conocen todo esto. No obstante, las especificaciones todavía contienen toda suerte de cláusulas poco prácticas referentes a lo que los licitantes deben hacer.

Tales especificaciones niegan por lo general cualquier responsabilidad que pudiera caber por la información que se le brinde al contratista referente a las condiciones locales. Casi siempre, estas provisiones no son claras. Todo el tiempo crean conflictos con otros párrafos de las especificaciones que tratan de favorecer al contratista cuando se presentan dificultades poco comunes en el subsuelo.

Como ejemplo de lo anterior, cabe mencionar la Sección 1-1.4 de las especificaciones de la American Water Works Association[6]. Esta sección sugiere hacer una lista de los perfiles de pozos de prueba, datos de pozos existentes, datos geológicos y cualquier otra información de las condiciones del subsuelo, y concluye con el siguiente párrafo:

"Esta información referente a las condiciones del subsuelo, se pretende que ayude al contratista en la preparación de su oferta. Sin embargo, el propietario no garantiza su exactitud, ni que sea necesariamente indicativa de las condiciones que se encuentren al perforar el pozo que se construya según este convenio, por lo que el contratista constatará personalmente todas las condiciones locales que pudiesen afectar su trabajo, y ni la información contenida en esta sección ni la que se obtenga de mapas o planos, o a través de representantes y empleados del propietario, eximirá al contratista de cualquier responsabilidad que le corresponda por el incumplimiento de todas y cada una de las cláusulas del contrato."

Supongamos que después de firmar un contrato tal, se le fija al contratista el sitio de perforación. Este se instala en el sitio y perfora a través de un cable telefónico. Este cable está indicado en el plano del lugar, pero ha sido mostrado en un sitio distante, 6 m, de la ubicación del pozo. ¿Será responsable el contratista por el daño causado al cable, al no haber verificado su localización? Bajo las especificaciones de la AWWA, parecería que sí.

Este tipo de exigencia pone al contratista fuera del negocio de la construcción y lo abandona al capricho de la suerte.

Las opiniones difieren mucho en lo tocante a quien debe asumir el riesgo en los contratos de construcción por la aparición fortuita de ciertas condiciones del subsuelo.

Los comités que representan a grupos de ingenieros y de contratistas han sugerido varios enfoques del problema.

Responsabilidad Mutua

Los siguientes párrafos han sido sugeridos por un comité conjunto de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles y la Asociación General de Contratistas, para que se utilicen en cierta forma de contrato:

"*Sección 7.* El propietario hará llegar a todos los probables licitantes, toda la información que él pudiese tener de las condiciones del subsuelo en la vecindad del sitio del trabajo, mapas topográficos u otra información que pudiese ser de utilidad al contratista, para valorar en forma adecuada la magnitud y el carácter del trabajo que pudiese ser necesario efectuar. Sin embargo, tal información es brindada como si fuese la más concreta de que se dispone, sin que se contraiga responsabilidad por su exactitud o por las conclusiones que el contratista pudiere derivar de ella.

"*Sección 8.* De inmediato y antes de que tales condiciones sean alteradas, el contratista notificará por escrito al propietario, respecto de: (1) aquellas condiciones físicas o latentes del subsuelo, en el sitio, que pudieran diferir notablemente de las que se indican en el contrato; (2) condiciones físicas desconocidas del sitio, de naturaleza poco común, y que difieran notablemente de las que por lo general se encuentran y que corrientemente se consideran como inherentes al trabajo motivo de este contrato. El funcionario encargado del contrato, deberá investigar de inmediato las condiciones y si encuentra que estas difieren sustancialmente y que podrían causar un aumento o disminución del costo o del tiempo necesario para su ejecución del contrato, se hará un ajuste equitativo y se modificará el mismo consecuentemente."

Los Riesgos Como Parte del Costo

Los términos anteriores no satisfacen a los que piensan que el contratista debería cargar con los costos adicionales que pudiesen surgir en un trabajo determinado. Aunque parecería que esto va en beneficio del propietario, este último es quien en realidad paga esos costos en cualquier caso. En cualquier riesgo que asuma, el contratista cauteloso incluye en sus costos el margen necesario para imprevistos. Si éstos no llegan a presentarse, ese margen le brinda al contratista una ganancia adicional.

Los aspectos involucrados en un convenio apropiado de contrato de construcción sujeto a condiciones imprevistas, han sido discutidos en detalle por Robert F. Borg[7], miembro del comité de administración de contratos de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. En su artículo, el señor Borg presenta y recomienda las siguientes cláusulas referentes al pago por aquellas condiciones inesperadas del subsuelo.

"Los documentos contractuales que indican el diseño de aquellas partes de la obra que irán por debajo de la superficie, se basan en los datos de que se disponga y en el criterio del ingeniero. Las cantidades, dimensiones y clases de trabajo que aparecen en los documentos del contrato, se convienen entre las partes como si estuviesen incorporadas a las suposiciones que dieron base al establecimiento del precio del contrato.

"Conforme las diversas partes del subsuelo se van perforando durante la construcción, el contratista, en forma inmediata y antes de que las condiciones encontradas se alteren, comunicará por escrito al ingeniero y al propietario, si esas condiciones difieren sustancialmente de las que en un principio se supuso que existirían. El ingeniero a su vez someterá de inmediato al propietario y al contratista, un plano o descripción de las modificaciones que él propone hacer en los documentos contractuales. El aumento o disminución resultantes del precio del contrato, como consecuencia de lo anterior, o el del tiempo necesario para su terminación, será calculado por el contratista y sometido a consideración del ingeniero en forma de propuesta . . .

"Una vez que el propietario apruebe las recomendaciones del ingeniero o reciba la decisión de un arbitraje, tanto el precio del contrato como el tiempo de terminación se ajustarán mediante una enmienda acorde con otras cláusulas de este contrato".

El señor Borg sostiene que la adopción de estos párrafos como parte de las condiciones generales de los contratos de construcción, contribuirá a reducir los costos, fomentará licitaciones más responsables y disminuirá la posibilidad de litigios.

Contrato Específico o Subcontrato

El pozo y sus complementos tales como la bomba, las regulaciones del motor, la casa de bombas, y la tubería de descarga pueden todos constituir un proyecto completo de construcción dentro de un contrato específico; como también, esto podría ser solamente una parte de un contrato general que abarque otros numerosos elementos necesarios en un proyecto más grande. Las especificaciones de un contrato global se preparan por lo general como una serie de

artículos o secciones, cada uno de los cuales cubre un elemento característico del proyecto. Las especificaciones del pozo constituyen una de estas secciones separadas.

Muchos redactores de especificaciones, preparan cada una de estas secciones separadamente, de forma que cubran un trabajo específico que generalmente es realizado por un contratista especializado. En la mayoría de los casos, probablemente resulte mejor ejecutar la perforación exploratoria y la del pozo permanente como un contrato específico separado, en lugar de un subcontrato que forme parte de un contrato general.

El párrafo que encabeza cada sección de las especificaciones técnicas, se intitula por lo general "Alcances del Trabajo". Este párrafo deberá incluir una definición generalizada y breve del trabajo que haya que realizar, y a renglón seguido una corta exposición de la labor no contemplada en esta sección de las especificaciones. La lista de los trabajos no incluidos consistirá de aquellos elementos estrechamente relacionados con la construcción del pozo y que pudieran ser propiamente parte del contrato de éste, pero que se describen en otra sección. A continuación se transcribe lo que podría ser un párrafo característico de "Alcances del Trabajo:"

ALCANCES: Esta sección se refiere a la construcción, desarrollo y prueba completos, de los pozos de abastecimiento y de los pozos experimentales. No comprende la bomba permanente, la casa de bombas ni el equipo de ésta.

En este párrafo de encabezamiento no debe intentarse describir todos los elementos del trabajo. Asimismo, descripciones muy elaboradas de las tareas relacionadas con suministro, materiales y similares, no tendrían significado. Tales estipulaciones calzan mejor en los párrafos que describen la forma de pago de los trabajos.

Descripción de las Condiciones del Sitio

A continuación de esta introducción siguen por lo general los párrafos que describen la localización del pozo, condiciones locales, linderos y protección del lugar de trabajo y una descripción del pozo o pozos. Seguidamente, deberá darse una lista de los perfiles de pozos exploratorios, datos de algunos pozos vecinos, disponibilidad de energía, condiciones extraordinarias que pudieran afectar el trabajo, informes geológicos y así por el estilo. Ya se ha discutido la responsabilidad que toca al propietario en cuanto a la información de las condiciones del subsuelo. Si no se dispone de información derivada de pozos exploratorios o de pozos existentes cercanos al sitio, ello debe claramente especificarse.

En párrafo aparte se describirán cuidadosamente las facilidades o materiales que el propietario vaya a suministar al contratista.

Ademe de Pozos

El tubo que se utilice como ademe permanente en los pozos de abastecimiento de agua deberá ser de material nuevo. El diámetro, el peso por metro y el espesor de sus paredes deberá estipularse. Los acoples deberán ser impermeables, ya sea que éstos sean soldados o roscados.

Tanto la tubería como las uniones serán lo suficientemente resistentes para que permitan su instalación sin dañarse, sea cualquiera el método de construcción de pozos que se emplee. Normalmente, el ademe del pozo deberá resistir fuerzas elevadas de compresión, tensión y aplastamiento. Además, debería durar por lo menos de unos 20 a 40 años estando en contacto con el suelo por la parte externa y con el agua y la humedad por el interior.

A través de los años, la tubería de acero ha demostrado ser la más práctica en la construcción de pozos. El metal Everdur, el

latón, el cobre y el acero inoxidable, se han utilizado en aquellas condiciones específicas en que la corrosividad del suelo o del agua pudieran limitar seriamente la vida útil de la tubería. Recientemente, se ha venido usando la tubería plástica como ademe, en pozos de hasta 15 cm. de diámetro perforados por el método rotatorio.

La tubería de acero se halla cubierta por especificaciones estándar a las cuales se debe referir. Los estándares más comunes de la tubería de acero se encuentran en las especificaciones ASTM A-53, ASTM A-120, y API 5L.

Tal como se recomendó en el Capítulo 11, la tubería de revestimiento API, o la mandrilada y alargada, son preferibles para pozos de agua. Los tamaños de un diámetro de 20 cm. y mayores de tubería de revestimiento, se producen regularmente en más de un espesor de pared y peso. Deberá especificarse la tubería más pesada cuando se desea obtener una vida útil prolongada en condiciones severas. Si el suelo y el agua son sólo ligeramente corrosivos, puede adoptarse un espesor de pared más delgado.

La Sociedad Americana de Normas, (American Standard Association) ha desarrollado un sistema para clasificar los diferentes espesores de pared de un diámetro dado de tubería, mediante números de clasificación. Las clasificaciones 10, 20, 30, 40, 80, y 120 designan los pesos más comunes. La clasificación 40, corresponde a toda la tubería de peso estándar cuyo diámetro sea de 15 cm. y menor. La Tabla XXXVII da espesores de pared, pesos y números de clasificación para tuberías de revestimiento de 20 cm. de diámetro o mayores.

Cuando se necesita un material resistente a la corrosión, tal como el acero inoxidable, para ademe o revestimiento, el espesor de la pared del tubo puede ser menor. La tubería de acero inoxidable de clasificación 10, podría resultar adecuada a diámetros de hasta 30 cm. Se supone que se van a utilizar acoples soldados, puesto que las uniones roscadas en la tubería de acero inoxidable presentan muchos problemas.

Detalles de la Rejilla

Los pozos que derivan su agua de acuíferos de arena y de grava, que son formaciones no consolidadas, exigen el empleo de rejillas para poder quedar bien

Tabla XXXVII
Espesores de Pared y Pesos de la Tubería de Revestimiento API

Tamaño Nominal (Pulg.)	(mm)	Espesor de la Pared (mm)	Peso del Tubo de Extremo Liso (kg/m)	Clasificación Numérica de ASA
8"	203	7,04	36,71	30
8"	203	8,18	42.43	40
10"	254	7,09	46,37	**
10"	254	7,80	50.80	30
10"	254	9,27	60.16	40
12"	305	8,38	65.05	30
12"	305	9,53	73.66	**
14"*	356*	9.53	81,10	30
16"*	406*	9,53	93.01	30
18"*	457*	9,53	104.91	**
20"*	508*	9,53	116.82	20

* Diámetro exterior
**No existe clasificación numérica ASA para el espesor de la pared de este diámetro de tubería.

terminados. Los detalles del diseño y fabricación de rejillas de pozo, se dieron en el Capitulo 7.

Las rejillas de pozo se fabrican en dos series de diámetro. Una de éstas, conocida como la de los tamaños telescópicos, provee rejillas diseñadas para ser instaladas a la manera telescópica, dentro de tubería cuya designación es del mismo diámetro. Por lo tanto, una rejilla telescópica de 20 cm. de diámetro, ha sido diseñada para hacerla deslizar por dentro de un tubo de 20 cm. de diámetro interior. La segunda serie suministra rejillas fabricadas al tamaño de la tubería, o sea, que son del mismo diámetro de la correspondiente tubería. Una rejilla, hecha al tamaño de la tubería y de 20 cm. de diámetro, tiene aproximadamente el mismo diámetro interior y exterior, que la tubería de 20 cm.

El diámetro de la rejilla que vaya a emplearse, depende tanto del método de instalación como del diseño básico del pozo.

La longitud necesaria de la superficie activa de rejilla, varía de acuerdo con el espesor de la formación acuífera, tipo de rejilla, tamaño y separación de las aberturas, capacidad que se desea obtener del pozo y factores semejantes. El área total de captación debe ser la suficiente como para permitir que el agua entre al pozo al caudal que se pretende con la mínima pérdida de carga o abatimiento. En muchos casos es preferible especificar una longitud aproximada de rejilla, y tomar las provisiones del caso para aumentar o disminuir ésta, si las características y el espesor del acuífero exigen una longitud distinta.

Los materiales que más comúnmente se emplean para fabricar las rejillas de pozo son el acero inoxidable AISI tipo 304 y el bronce Everdur. La experiencia ha demostrado que la vida útil más prolongada de las rejillas fabricadas con estos materiales resulta a largo plazo más económica. El bronce rojo al silicio presta buen servicio en aguas que no sean agresivas. Las rejillas de hierro galvanizado Armco y de acero de bajo contenido de carbono tienen una duración limitada; éstas resultan más adecuadas a los pozos provisionales o a los de observación.

La rejilla de pozo de ranura continua provee una mayor área de captación por metro cuadrado de superficie, que cualquier otro diseño. A continuación se da un ejemplo de algunos párrafos de especificaciones referentes a rejillas de este tipo.

REJILLA DEL POZO: La rejilla del pozo deberá ser del tipo de ranura continua, fabricada con alambre o barras arrollados o estirados en frío, y de forma especial. El arrollado exterior de alambre que constituye la superficie de la rejilla y las barras longitudinales interiores deberán fijarse firmemente entre, sí, en cada intersección de estos miembros, preferiblemente por el método de soldadura. Ambos elementos deberán ser del mismo material. Se aceptarán ya sea el tipo 304 de acero inoxidable conforme a los requisitos exigidos por la AISI, o el bronce Everdur que se ajuste a las especificaciones de la ASTM B 124, Aleación 7.

La rejilla todos los accesorios necesarios para su satisfactoria instalación y funcionamiento, deberán ser esencialmente productos regulares de algún fabricante ligado a la producción de tal género.

Si la construcción de la rejilla incluye un núcleo tubular perforado, éste deberá ser, cuando menos, tubo de clasificación 10 y de los mismos materiales que la superficie de la rejilla, para evitar la corrosión electrolítica que pudiera desarrollarse en una rejilla construída con dos metales diferentes.

La longitud mínima de la rejilla será de — metros, sin incluir las secciones ciegas. Deberá tener una área de captación suficiente para dejar pasar — m³/hora, a una velocidad de 3 cm/segundo o menor. El diámetro de la rejilla deberá ser de por lo menos — centímetros.

Las aberturas de la rejilla deberán tener un ancho adecuado para permitir que el pozo se pueda desarrollar hasta lograr una condición de ausencia de arena, por métodos naturales; o también podrán ser de un ancho tal que retengan un 90 por ciento del materiol del filtro artificial de grava, en el caso de que el pozo se acondicione en esta forma.

Los acoples que conectan los tramos de rejilla deberán ser del tipo de anillos a tope y del mismo material que ésta; los acoples también pueden hacerse mediante soldadura de tope. Si la rejilla se instala haciéndola descender por dentro del ademe, su extremo superior deberá acondicionarse con un empaque de plomo o de hule. En el fondo de la rejilla deberá fijarse firmemente algún tipo de accesorio de cierre automático o parecido.

Si el ingeniero así lo solicita, deberá someterse a su aprobación un plano que muestre los detalles de construcción y las dimensiones de la rejilla, como también el de sus accesorios.



Fig. 336: Acoplando tramos de rejilla Johnson de ranura continua, durante la instalación.
(Cortesía de la Municipalidad de Lafayette, La.)



Fig. 337: Instalación de una rejilla Johnson de ranura continua, en un pozo acondicionado con filtro de grava en New Jersey.
(Cortesía de Artesian Well Drilling Co.)

Especificaciones Alternas de la Rejilla

En los párrafos siguientes se dan especificaciones algo más concisas referentes a la rejilla que vaya a instalarse en un pozo desarrollado por vía natural:

REJILLA DEL POZO: El diámetro de la rejilla no deberá ser menor de — centímetros, y su longitud no menos de — metros, aparte de los tramos ciegos.

La rejilla deberá fabricarse de acero inoxidable tipo 304 o de metal Everdur.

Esta será del tipo de ranura continua y de fabricación a base de soldadura, para garantizar alta resistencia. La rejilla debe ser adecuada para resistir las fuerzas externas a las cuales estará sometida durante y después de su instalación. Las aberturas deberán ser de forma de V, ensanchádose hacia adentro para permitir

que las partículas finas pasen a través, sin quedar atrapadas durante el desarrollo del pozo.

El ancho de las aberturas de la rejilla se escogerá con base en el análisis granulométrico de muestra de la formación acuífera. El análisis granulométrico deberá ser realizado por un laboratorio experimentado, o se solicitará al fabricante de la rejilla que suministre estos análisis y dé las recomendaciones del caso, todo lo cual se someterá al ingeniero para su revisión y aprobación.

La rejilla se suministrará con todos los accesorios necesarios para cerrar el fondo y proveer un cierre hermético entre su extremo superior y el ademe del pozo. Para esto último se puede utilizar un empaque de plomo o de hule. Todos los accesorios, excepto el empaque y el tapón del fondo, deberán ser del mismo material que la rejilla.

En algunos casos puede que se desee especificar el área de captación de la rejilla como un porcentaje de la superficie bruta. Esta relación varía con el ancho de las aberturas y con el diseño de la rejilla. Los datos específicos pueden obtenerse de los diversos fabricantes. Si se va a considerar la alternativa de diferentes tipos de rejilla, se puede incluir el siguiente párrafo:

La comparación de tipos alternos de rejillas que se propone suministrar, se hará con base en la proporción respectiva de área abierta a superficie total, en cada caso.

El diseño de un pozo que se vaya a construir en una formación de grava o arena no consolidadas puede prepararse de una de dos maneras: desarrollándose por vía natural, o acondicionándose con un filtro artificial de grava. Los detalles pertinentes de las especificaciones, según el caso, pueden tomarse de la discusión de diseños de pozos del Capítulo 10.

Desarrollo y Acabado del Pozo

Al contratista debe permitírsele considerable libertad para escoger los métodos de desarrollo. Los que tienen experiencia en este campo conocen los procedimientos que resultan mejores en ciertas condiciones.

Los párrafos siguientes describen los resultados mínimos que el contratista deberá obtener dentro del precio de su contrato. Estas cláusulas suponen que la propuesta contempla un precio unitario por hora, en el caso de que se requiera un trabajo suplementario de desarrollo.

DESARROLLO DEL POZO: El contratista deberá desarrollar el pozo mediante procedimientos que permitan extraer con eficacia del acuífero la mayor cantidad práctica de arena, fluído de perforación y otros materiales finos, para llevar al pozo hasta su máximo rendimiento por metro de abatimiento y a una condición de ausencia de arena. Para efectuar el trabajo de desarrollo pueden emplearse aire comprimido, pistones de agitación, chorros de agua de alta velocidad y bombas. Este trabajo deberá ejecutarse en forma tal que no produzca una subsidencia indebida ni alteración de los estratos que yacen por encima del acuífero, ni dañen el sello colocado alrededor del ademe disminuyendo así la protección sanitaria que éste proporciona.

El desarrollo del pozo deberá continuarse hasta que el agua extraída por bombeo, al máximo caudal de prueba, esté aclarada y se encuentre libre de arena. Se considerará que el agua se halla libre de arena cuando las muestras tomadas durante la prueba de bombeo no contengan más de 2 partes por millón de arena por peso.

El ingeniero puede exigir labor adicional de desarrollo con el propósito de mejorar la capacidad específica del pozo. Este trabajo suplementario se pagará con base en una tarifa horaria.

Bajo estos requisitos, el contratista es responsable por el desarrollo del pozo hasta que la formación se haya estabilizado completamente y el agua se encuentre libre

de arena. Al mismo tiempo esta labor normalmente desarrollará el pozo hasta su máxima eficiencia. Si, debido a condiciones excepcionales, el ingeniero encuentra que la capacidad específica del pozo puede aún mejorarse mediante un mayor desarrollo puede ordenarlo así, lo que se pagará al precio unitario establecido en el contrato.

La cantidad tolerable de arena que un pozo puede erogar varía de acuerdo con el uso que se la vaya a dar al agua. Se sabe, claro está, que cualquier cantidad de arena presente en el agua puede dañar la bomba.

En algunos casos, una parte por millón puede ser el límite permisible en un sistema que contiene varias válvulas y orificios, tal como un sistema inundado de recuperación secundaria de aceite. En los abastecimientos de agua municipales e industriales, puede tolerarse de 2 a 3 ppm. Si el uso es en riego, éste admite tanto así como unas 20 ppm. Con una concentración de 20 ppm, un pozo que esté bombeando 2,700 litros por minuto descargará 77 kilogramos de arena en 24 horas.

En el Capítulo 14 se dan detalles de los métodos que se utilizan en el desarrollo de pozos. La labor de desarrollo constituye un paso necesario al completar todo tipo de pozos. Se aplica a los pozos que derivan su agua tanto de arenas saturadas como de acuíferos constituídos por rocas consolidadas. La mayor parte de los pozos no alcanzarán su máxima eficiencia, si no han sido desarrollados adecuadamente.

Obtención de la Producción Disponible

Se dispone de métodos muy prácticos para calcular la capacidad productora de una formación acuífera, mediante los resultados obtenidos en pruebas de bombeo. Con base en esto, se puede evaluar la capacidad específica potencial en un pozo de determinado diseño. El ingeniero y el propietario podrán comparar ésta con la que realmente se obtenga, y juzgar así la posibilidad de mejorar el pozo mediante un mayor desarrollo.

Cuando se conoce que el acuífero es una formación artesiana, y si la longitud de la rejilla es de por lo menos tres cuartas partes del espesor de la formación, es posible exigir



Fig. 338: Muestreo de agua que está siendo bombeada de un pozo completamente desarrollado y estabilizado, para verificar su contenido de arena; este es uno de varios pozos de una fábrica de papel de Michigan.
(Cortesía de C. S. Raymer)

al contratista que obtenga por lo menos un 85 por ciento de la capacidad específica potencial. Tal requisito no puede aplicarse cuando el pozo intercepta un acuífero freático o cuando la longitud de la rejilla, siendo muy corta, permite solamente una penetración parcial dentro del acuífero.

Nunca deberán especificarse pruebas escalonadas de bombeo para tratar de medir la eficiencia del pozo, excepto en el caso de un acuífero artesiano bien definido y si se cuenta con una rejilla cuya longitud sea sustancialmente igual al espesor del acuífero. Las pruebas escalonadas de bombeo, en pozos cuya penetración es parcial y en los que se encuentran en acuíferos freáticos, no pueden ser interpretadas con suficiente confianza para propósitos de especificación.

No es fácil redactar especificaciones para labores de perforación y otros detalles referentes a pozos, en un estilo claro y positivo. Como en todos los trabajos bajo la superficie, se tropieza con condiciones inesperadas más frecuentemente que cuando se construye sobre aquella.

Cuando las condiciones de trabajo parecieran impredecibles, existe la tentación de irse a un extremo o al otro. En un caso, se tratará de describir y restringir los procedimientos en un marco de condiciones rígidas y limitadas. La tendencia contraria, es la de describir los requisitos en forma vaga y general empleando a menudo la expresión "tal como lo indique el ingeniero."

Referencias

1. HILL v. POLAR PANTRIES, 219 S.C 263, 64 S.E. 2d 885.
2. United States v. Spearin, 248 U.S. 132, 39S. Ct 59, 61, 63 L.Ed 166
3. Trustees of the First Baptist Church v. McElroy, Miss., 78 So. 2d 138
4. Frederick v. County of Redwood, 152 Minn. 450, 190, N.W 801
5. MacKnight Flintic Stone Co., v. City of New York, 160, N.Y 72, 54 N.E 661.
6. WILLIAMS, CLYDE E., & ASSOC., "Well Specifications for the Town of Milford, Indiana," (1955), South Bend, Indiana.
7. BORG, Robert F., "Who Pays for the Unexpected in Subsurface Construction?" Civil Engineering Vol. 31, No. 6, (1961), American Society of Civil Engineers, New York.
8. "Sampling Industrial Water," D510-64T. American Society for Testing Materials, Philadelphia.
9. "AWWA Standards for Deep Wells," A 100-58, (1958), American Water Works, Association, New York.
10. "Steel Tubular Products," (1957), American Iron and Steel Institute, New York.

Capitulo 20

Bombas

UNA VEZ completado el pozo, habiéndose servido de la destreza y la experiencia de un perforador experto para construirlo de modo que se pudiera obtener el agua disponible en el acuífero o la que necesitara el propietario, deberá instalarse algún tipo de bomba para elevar el agua y llevarla hasta el punto en que ésta va a utilizarse.

Una bomba sirve para diversos propósitos. Esta puede elevar el líquido desde un nivel a otro, como es el caso de un pozo que se está bombeando. O también puede causar que un fluido se desplace a través de una tubería desde un punto de abastecimiento hasta otro punto distante, de utilización. Puede a su vez impartirle una alta velocidad al agua como a la hora de apagar un incendio, o desplazar un líquido contra la resistencia que se opone a su movimiento, como en una caldera o al hacer funcionar una gata hidráulica.

Una bomba no desarrolla ninguna energía propia. Simplemente transfiere la fuerza de una fuente de energía, para poner en movimiento un líquido. Por ejemplo, un motor eléctrico puede imprimir energía a una bomba para poder utilizar el agua ya sea por conducción directa o por almacenamiento. Si el agua es almacenada, ésta podría ser llevada a un nivel más elevado para dejarla fluir luego por gravedad, o bombeada hasta un tanque hidroneumático, dotado de un colchón de aire que puede comprimirse. Cualquiera de estos procedimientos almacena energía para la extracción del agua cuando ésta se necesita en el punto de utilización.

La necesidad de agua ha agudizado siempre el ingenio humano. Para satisfacerla se hace necesario elevar el agua desde lagos, pozos y ríos. Resulta por lo tanto muy natural, que las bombas sean algunas de las máquinas más antiguas conocidas por el hombre. Los seres primitivos se ingeniaron tales equipos en la forma de cubos, cucharones y sencillos malacates. De aquí siguieron máquinas más evolucionadas movidas a mano para transportar líquidos de toda clase, elevarlos desde grandes profundidades hasta grandes alturas, y obligarlos a desplazarse por dentro de tuberías a través de distancias virtualmente ilimitadas.

Clases de Bombas

Existen varias maneras de clasificar las bombas. Una clasificación básica las divide en dos grupos, a saber:

1 Bombas de desplazamiento constante, que suministran esencialmente la misma cantidad de agua contra cualquier carga que esté dentro de su capacidad de funcionamiento

2 Bombas de desplazamiento variable, que entregan el agua en cantidad que varía inversamente con la carga contra la cual están operando.

Ambos tipos de bombas pueden utilizarse para extraer agua de un pozo. En el servicio de pozos, la industria respectiva clasifica las bombas de estos grupos en bombas de pozo poco profundo y bombas de pozo profundo. Sin embargo, la división de las bombas en estas dos clases, se hace de acuerdo con su posición relativa a la estructura del pozo, haciendo caso omiso de la profundidad del mismo. Una bomba que se encuentra instalada por encima del pozo se denomina bomba de pozo somero; la que se halle instalada por dentro del pozo, a cierta profundidad por debajo de su extremo superior, recibe el nombre de bomba de pozo profundo.

Aunque esta clasificación tiene la ventaja de hallarse muy difundida es, no obstante, imprecisa y sin sentido. No es exacta porque no distingue a las bombas por sus condiciones de operación más significativas; no tiene sentido, puesto que sus términos son inconsistentes. Las condiciones de operación de las bombas no guardan necesariamente ninguna relación con la profundidad del pozo.

La así llamada bomba de pozo somero es la que se coloca por encima del pozo y toma el agua de éste, mediante aspiración. Tal bomba puede emplearse tanto en un pozo profundo como en uno somero, mientras el nivel de bombeo se halle dentro de la capacidad de succión o aspiración de la bomba.

La unidad de bombeo de la denominada bomba de pozo profundo se instala dentro del ademe del pozo y, por lo general, con la campana de succión sumergida por debajo del nivel dinámico o de bombeo. Por lo tanto, la captación se halla normalmente sometida a una carga positiva de presión. La llamada bomba de pozo profundo deberá utilizarse en cualquier pozo, no importa cuán profundo sea, en el que el nivel de bombeo se encuentre por debajo del límite de succión.

Es evidente que se necesita un mayor número de términos descriptivos en estas clasificaciones de bombas. En este capítulo vamos a utilizar el término *bomba de aspiración o de succión* en lugar de bomba de pozo somero, y la expresión *bomba de sumergencia positiva* en vez de bomba de pozo profundo.

Presión Negativa o Aspiración

La aspiración ejercida por una bomba no depende de ninguna fuerza aplicada directamente al agua por la bomba misma, sino de la presión negativa que se desarrolla a la entrada de ésta. Una carga negativa de presión equivale a una altura inferior a la presión atmosférica.

Esta presión negativa se denomina también succión o aspiración. La succión o aspiración consiste en la acción de atraer un fluído hasta una tubería o una cámera de bombeo, mediante la producción de un vacío parcial, esto es, reduciendo la presión por debajo de la atmosférica. La presión atmosférica, sobre la superficie libre del agua contenida en un pozo, obliga al agua a subir y a desplazarse hasta aquella parte de la bomba en que se ha desarrollado una presión menor (succión o aspiración).

Si el agua se halla en movimiento, la máxima altura de succión queda limitada por cuatro factores, a saber: presión atmosférica, presión de vapor, pérdidas de carga debidas a fricción y carga exigida por la bomba misma a la entrada.

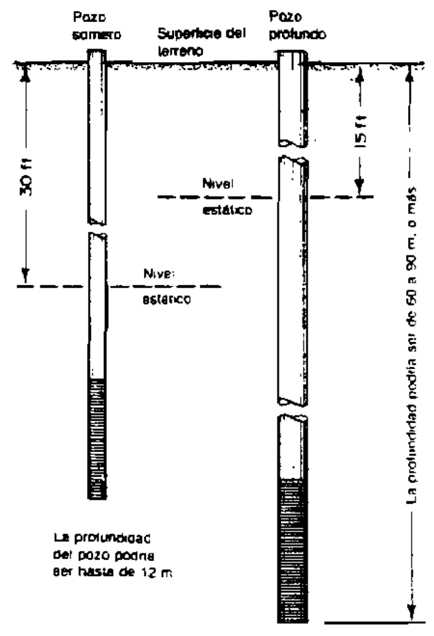


Fig. 339: La denominada bomba de pozo somero podría utilizarse para el pozo profundo de la derecha, pero no en el pozo somero de la izquierda, puesto que la profundidad del agua en éste es muy grande como para permitir que se produzca la succión o aspiración.

La presión atmosférica varía de acuerdo con las condiciones de la atmósfera y la elevación sobre la superficie de la tierra. En la práctica se supone que la atmósfera terrestre ejerce normalmente al nivel del mar una presión de 760 mm. de mercurio, equivalente a 10.33 m. de columna de agua. Por lo tanto, al nivel del mar y bajo condiciones normales, se puede suponer que una columna de agua podría ser elevada hasta una altura de 10.33 m., si una bomba pudiese producir un vacío perfecto.

Sin embargo, esta succión no podría manifestarse, aúnque se produjese un vacío perfecto, debido a los otros factores que la limitan, como son la presión de vapor y la fricción en la tubería. El agua, al igual que todos los líquidos, tiene la tendencia a transformarse del estado líquido al de vapor. Se dice que los líquidos ostentan altas presiones de vapor, cuando su tendencia a la evaporación es grande. Muchos de los líquidos permanecen en este estado solamente cuando se hallan sometidos a presiones mayores que la atmosférica. Algunos otros tienen una presión de vapor baja, y sólo muestran una pequeña tendencia a la evaporación, aún dentro del máximo vacío obtenible. El agua se halla en medio de estos dos extremos. La tendencia del agua a evaporarse, lo mismo que su presión de vapor, aumentan rápidamente conforme a su vez lo hace la temperatura.

La presión de vapor es un factor de gran significación en el funcionamiento de todos los dispositivos de bombeo. Es de particular importancia en las bombas de desplazamiento variable, tales como las bombas centrífugas, y su importancia

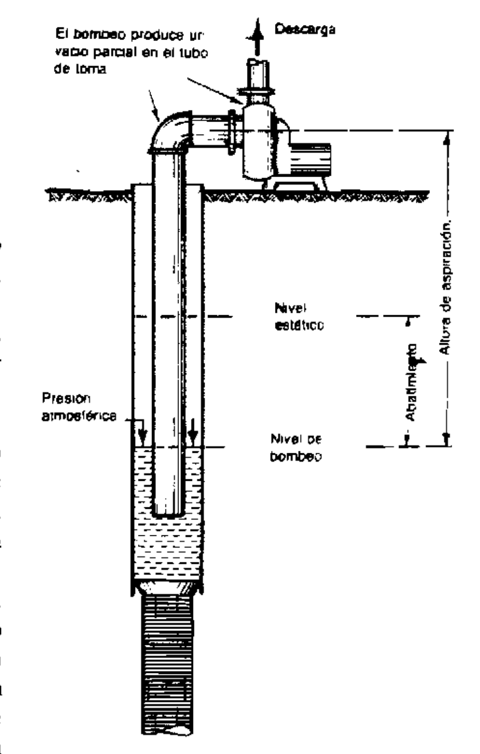


Fig. 340: Cuando una bomba produce un vacío parcial en su entrada, la presión atmosférica fuerza el agua a desplazarse hacia el tubo correspondiente.

disminuye en los mecanismos de desplazamiento positivo. La presión de vapor ejerce un efecto limitante en la altura de aspiración de todos los tipos de bombas. Aún en las bombas de desplazamiento constante del tipo más eficiente, si el agua se halla a una temperatura próxima o igual a la del punto de ebullición, deberá alimentar a la bomba bajo una presión positiva para poder ser bombeada, porque la presión del vapor en el punto de ebullición, siendo igual a la presión atmosférica, no permitiría obtener ninguna altura de aspiración.

Cavitación

Cuando se bombea agua, si la presión en cualquier punto de la tubería de aspiración o en la bomba misma, llega a reducirse a un valor igual al de la presión de su vapor, se forman burbujas de aire en el seno del líquido. Cuando se desplazan hasta puntos de mayor presión en su recorrido por la bomba, estas burbajas estallan violentamente por la acción llamada implosión. La formación y el estallido de estas burbujas de vapor, se denomina *cavitación*. Esta puede interferir con el funcionamiento de la bomba, y también dañar partes de la misma, al producir agujeramiento o vibración excesiva.

La cavitación se manifiesta cuando la carga hidráulica sobre la entrada de la bomba, es muy pequeña para la operación específica que se está realizando. Cuando el agua hace su entrada al mecanismo de la bomba, la carga debe ser suficientemente alta para que en el interior de la bomba, cuando la velocidad aumenta y la presión disminuye, esta última no pueda descender hasta el punto de vaporización, en ningún lugar del recorrido del agua. La carga que se necesita en el punto de entrada de la bomba, se denomina *carga neta requerida a la entrada*, NRIH.

La carga neta requerida a la entrada, necesaria para un funcionamiento satisfactorio de la bomba, es función del diseño de ésta última. La carga varía según los tipos de bombas, modelos de éstas, y con diferentes bombas de la misma fabricación. Asimismo, varía con la velocidad y capacidad de cualquier bomba del tipo centrífugo.

La carga requerida a la entrada puede ser menor o mayor que la correspondiente a la presión atmosférica. No obstante que constituye una característica de la bomba misma, su magnitud, sin embargo, es enteramente independiente de la presión atmosférica. En consecuencia, la carga requerida a la entrada podría expresarse con propiedad, como una carga de presión con relación al cero absoluto. Si el plano de referencia corresponde al cero absoluto, la carga requerida a la entrada será siempre positiva. Esta carga fundamental, necesaria para cualquier bomba, puede denominarse en una forma descriptiva como *carga neta requerida a la entrada (absoluta)*, NRIH(*a*). Este término es equivalente al de "carga neta requerida de succión positiva, NPSHR" que se utiliza corrientemente en la industria de bombas.

En una bomba centrífuga, el término entrada de la bomba se refiere al ojo del impulsor inferior o más profundo. El término toma o captación, tal como se usa en este capítulo, se refiere a su vez a la entrada en la tubería que conduce el agua desde el pozo a la bomba.

Para lograr una operación adecuada de la bomba, el sistema debe de suministrar suficiente carga de presión, tomando en cuenta otros factores hidráulicos, para igualar o exceder la carga neta requerida a la entrada. Esto hace que sea necesaria una carga total (absoluta), a la entrada de la bomba, por lo menos igual a la suma de la carga neta requerida a la entrada (absoluta), más la presión de vapor del agua y más las pérdidas de entrada y de fricción en la tubería de aspiración. Esta sumatoria podría denominarse *carga total requerida a la entrada (absoluta)*.

Carga de Entrada Disponible vs Requerida

En cualquier instalación específica, la carga total disponible a la entrada (absoluta), deberá ser igual o superior, a la carga total requerida a la entrada (absoluta). Cuando el nivel dinámico se halla por debajo de la entrada de la bomba, la *carga total disponible a la entrada* (absoluta) es igual a la presión atmosférica* (expresada en metros de agua), *menos* la distancia vertical desde el nivel dinámico o de bombeo hasta la entrada de la bomba. Si el nivel de bombeo se halla por encima de la entrada de la bomba, la *carga total disponible a la entrada* (absoluta) es equivalente a la presión atmosférica* *más* la distancia vertical desde el nivel dinámico hasta la entrada de la bomba.

Los requisitos hidráulicos exigidos por la toma de una instalación particular se pueden quizá visualizar mejor, estableciendo la elevación necesaria del nivel dinámico con respecto a la de la entrada de la bomba. La diferencia entre la presión atmosférica y la carga total requerida a la entrada (absoluta) nos dará, ya sea, la máxima altura de aspiración o la mínima sumergencia de la bomba, para lograr una operación satisfactoria. Tal como se indica en la Fig. 341, si la carga total requerida a la entrada es menor que la presión atmosférica, la diferencia equivale a la altura permisible de aspiración de la bomba.

Si la carga total requerida a la entrada resulta mayor que la presión atmosférica, la diferencia corresponde a la mínima profundidad a que debe sumergirse la entrada de la bomba, por debajo del nivel dinámico del pozo.

La carga total disponible a la entrada (absoluta) puede siempre aumentarse, si la bomba se coloca a un nivel inferior dentro del pozo. También puede aumentarse operando el pozo a un nivel dinámico más alto, lo que se obtiene haciendo disminuir el abatimiento.

*Obsérvese que los valores de la presión atmosférica siempre se refieren al cero absoluto de presión, aunque la designación "absoluto" nunca se usa conjuntamente con el término para definir este hecho

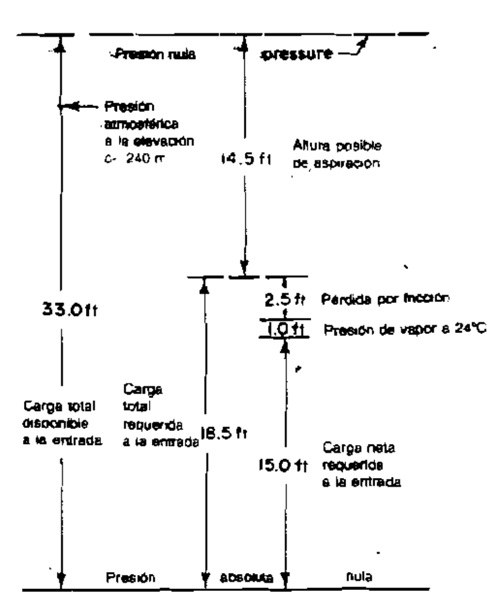


Fig. 341: Mediante este diagrama, se puede obtener la máxima altura posible de aspiración de una bomba determinada, en las condiciones indicadas de presión atmosférica, pérdidas por fricción y presión de vapor.

Las pérdidas de carga causantes de la reducción en capacidad de aspiración surgen de factores tales como el desplazamiento del agua por las partes activas de la bomba, y de la carga consumida al producirse el flujo a través de la misma y de la tubería de captación.

Bombas de Desplazamiento Positivo

Las bombas de desplazamiento positivo descargan el mismo volumen de agua, no importa la magnitud de la carga contra la cual se encuentren operando. En la práctica, esto no es estrictamente cierto, principalmente por las pérdidas que se producen en las partes móviles. En este tipo de bombas, la potencia necesaria debe ser tal

que permita operarla a su capacidad de descarga contra la máxima altura que puede desarrollar. Cuando se utiliza en un sistema de abastecimiento de agua, el caudal de descarga es esencialmente el mismo para cualquier presión del sistema, pero la potencia que demanda varía en proporción directa con la presión.

Existen varios diseños de bombas de desplazamiento positivo, pero los siguientes son los tipos más extensamente usados:

1. Bombas de émbolo (movimiento alternativo)
2. Bombas rotatorias
3. Bombas helicoidales o exprimidoras

Todas las bombas de émbolo funcionan mediante el movimiento de un pistón que desplaza el agua contenida en un cilindro. El flujo se controla con válvulas.

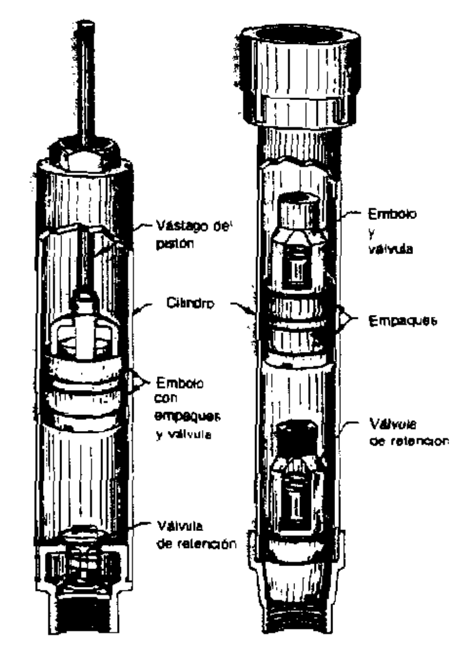


Fig. 342: Bombas de pistón de acción simple, suspendidas de la tubería de descarga. Estas se pueden instalar a casi cualquier profundidad en los pozos de pequeño diámetro.

Bombas de Émbolo

La disposición más sencilla consiste en la bomba de un solo pistón, que se muestra esquemáticamente en la Fig. 342. Cuando el émbolo es retraído hacia arriba, la válvula del pistón se cierra por acción de la gravedad y por la presión del agua que se halla por encima. En esta forma, se evita que el agua regrese al cilindro. En consecuencia, se produce una disminución de presión por debajo del pistón en movimiento. El agua fluirá a través de la válvula de acceso hasta el cilindro de la bomba, como resultado de la diferencia de presión causada por la carrera o desplazamiento del pistón.

Una vez que el pistón se mueve hacia abajo, la válvula de acceso se cerrará en el instante en que la presión por encima de ella supere a la presión por debajo; asimismo, la válvula de descarga se abre cuando la presión por debajo de ésta excede a la que se aplica por encima. En esta forma, el cilindro se llena de agua durante el movimiento descendente del pistón, la que en el siguiente desplazamiento ascendente, es forzada a descargar en la tubería.

Puesto que el agua es prácticamente incompresible, el pistón desplaza el mismo volumen de agua en cada movimiento o carrera, independientemente de la presión, descontando cualquier pérdida a través del pistón o de las válvulas. En esta forma queda ilustrado el principio en que se basa la operación de las bombas de pistón. Es evidente que tales bombas exigen la energía necesaria para poder obtener de ells su máxima presión, y que deben de protegerse contra reventaduras mediante algún dispositivo tal como una válvula de alivio, en caso de que el interruptor de presión u otro mecanismo regulador, llegaran a fallar.

Aunque el principio básico que se acaba de describir se aplica a todas las bombas de émbolo, existen muchos diseños modificados que permiten adaptar estas bombas a usos específicos. Entre estas modificaciones, podemos mencionar las siguientes:

Bombas de Doble Acción, que se construyen con pistones y válvulas dispuestas en forma tal, que se logra bombear el agua tanto durante el desplazamiento ascendente, como en el descendente, del pistón. Estas son, por lo general, bombas de aspiración pero también se fabrican para presión a la entrada, como es el caso en las instalaciones de pozos.

Bombas Duplex y Triplex, que consisten respectivamente de dos o tres pistones, y que se diseñan para bombear un chorro continuo con pulsación mínima, a menudo contra altas presiones, como en la alimentación de calderas.

Bombas de Dos Carreras, que tienen un cabezote que hace funcionar alternativamente dos pistones dentro de un mismo tubo y cilindro. Esta disposición provee un flujo constante de agua con poca pulsación. Durante varios años, la industria y las municipalidades utilizaron este tipo de bomba en los pozos de agua, pero luego fue desplazada grandemente por las bombas centrífugas verticales a principios de este siglo.

Bombas Rotatorias

El tipo rotatorio de bomba se utiliza ampliamente. Existen muchas modificaciones de diseño que se usan en aplicaciones especiales. Con pocas excepciones, todas las modificaciones son del tipo de succión, salvo cuando la bomba se utiliza con propósitos de rebombear el agua conjuntamente con otra bomba, para aumentar la presión, o para bombear agua caliente u otros líquidos que tengan una alta presión de vapor, en cuyos casos la bomba funciona bajo presión positiva de entrada.

Los tipos que generalmente se encuentran, utilizan engranajes o aspas rígidas y flexibles. Estas bombas no necesitan válvulas.

La bomba rotatoria original utilizaba engranajes. Tal como se puede observar en la Fig. 343, resulta muy sencilla en su principio y construcción. Esta consiste de una carcasa lisa con aberturas de entrada y salida, y los agujeros para los ejes y los engranajes. Los engranajes se colocan en forma ajustada dentro de la carcasa y disponen de un juego mínimo. Al girar, los engranajes arrastran el agua entre sus dientes, permitiendo así que una nueva cantidad de ésta haga su ingreso por la parte exterior de la carcasa y en el punto de entrada de los dientes móviles.

La bomba característica rotatoria de aspas rígidas, tiene una serie de divisiones o difusores colocados dentro de un rotor ranurado. Cuando se hacen girar, estas aspas se mueven radialmente conformándose al contorno de la carcasa, la que es excéntrica con respecto al rotor, y lográndose así que el agua sea empujada desde la bomba, mediante un flujo continuo hacia adelante de las aspas. Como se crea un vacío parcial o reducción de presión, el agua se desplaza dentro de la carcasa por detrás de las aspas.

La bomba rotatoria de aspas flexibles contiene paletas elásticas (por lo general de hule) que se doblan para provocar un cambio en el volumen de desplazamiento, lo que impulsa al agua a través de su trayectoria.

Las denominadas bombas helicoidales, o *exprimidoras*, son posteriores modificaciones del principio de la bomba rotatoria. Los diseños característicos de estas bombas se muestran en las ilustraciones.

Uno de los tipos de bombas helicoidales consiste de un rotor helicoidal con la forma de un tornillo sin fin, colocado dentro de un estator de cavidades dobles. El rotor (o sea el tornillo) se fabrica de metal pulido y el estator de hule. Un montaje flexible permite la acción excéntrica entre el rotor y el estator. El rotor, girando a velocidad moderada, comprime el agua dentro de las cavidades del estator mediante un flujo continuo. El agua actúa como lubricante entre los dos elementos de la bomba.

El principal uso de la bomba exprimidora

es el de proveer un diafragma protector, por lo general de hule o de algún compuesto plástico, entre el mecanismo de la bomba y el fluído corrosivo que se está bombeando. Tales bombas se utilizan en los sistemas de abastecimiento para agregar reactivos químicos al agua. Las ilustraciones muestran el principio en que se basan esas bombas, las cuales se construyen utilizando un tubo flexible como conductor, a lo largo del cual el agua es exprimida por el rotor, lo que siempre mantiene al líquido por delante de los dos puntos de contacto.

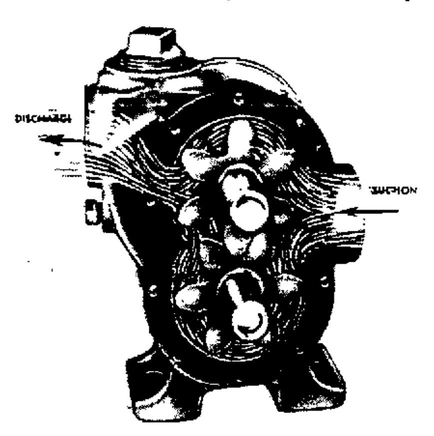


Fig. 343: La bomba rotatoria de engranajes, desplaza volúmenes positivos de agua atrapada entre los dientes y la carcasa.
(Cortesía de Goulds Pumps, Inc.)

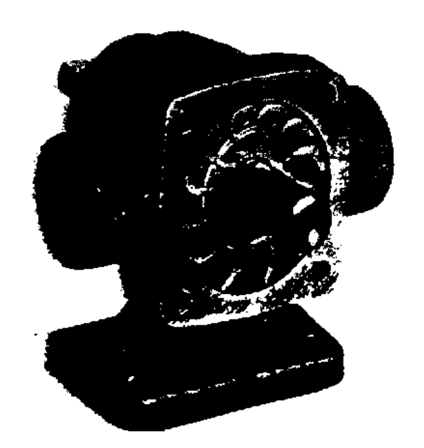


Fig. 344: Diseño típico de una bomba rotatoria de aspas flexibles.
(Cortesía de Hypro Engineering, Inc.)

Bombas de Desplazamiento Variable

Las principales clases de bombas de desplazamiento variable son las siguientes:

1. Bombas centrífugas.
2. Bombas de eyector.
3. Bombas de inyección de aire.

La característica que distingue a estas bombas es la relación inversa que existe entre el caudal que pueden suministrar y la carga contra la cual se realiza el bombeo. Conforme aumenta la carga de bombeo, la descarga disminuye. Al contrario de lo que sucede con una bomba de desplazamiento positivo, en las de desplazamiento variable, y debido al aumento en la descarga, que tiene lugar cuando la carga de bombeo disminuye, se necesita aplicar la máxima potencia cuando la altura de bombeo es baja.

Mediante diseños especiales se puede modificar esta tendencia, tal como luego se discutirá, pero esta característica es básica y típica.

Las bombas centrífugas son, sin duda alguna, las más importantes de todas estas. De hecho, las bombas centrífugas se usan más extensamente que cualquier otro tipo. Los principios fundamentales de la bomba centrífuga se descubrieron y demostraron experimentalmente hace alrededor de 300 años, pero poco avance se logró en el desarrollo de dispositivos prácticos hasta las postrimerías del Siglo 19.

Una de las razones más importantes de este lento progreso fue la falta de adecuados recursos de energía. En esencia, la bomba centrífuga es una máquina de alta velocidad. Su utilización recibió un gran impulso con el advenimiento de la turbina de vapor y del motor eléctrico. Si se usa en combinación con estas fuentes de energía, la bomba centrífuga se revela como un mecanismo de bombeo capaz de descargar agua en grandes cantidades contra cargas altas y también bajas y con alta eficiencia. Al combinarse

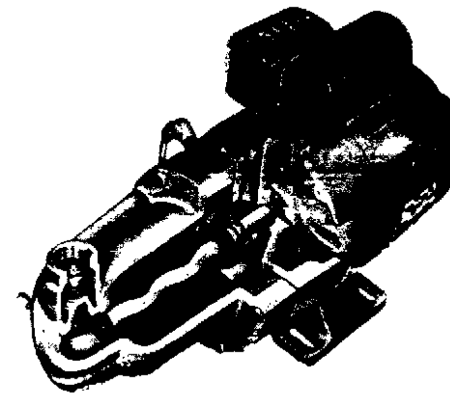


Fig. 345: Modelo de bomba de tornillo sin fin horizontal, diseñada para usarse como bomba de succión.
(Cortesía de Robbins-Myers, Inc.)

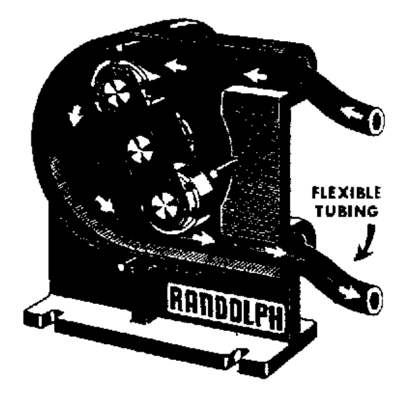


Fig. 346: Bomba exprimidora, usada corrientemente como dispositivo de dosificación de reactivos químicos.
(Cortesía de Randolph Co.)

estas características con sus otros atributos tales como suavidad de funcionamiento, simplicidad, compacidad y adaptabilidad a diversos sistemas de transmisión no es de sorprenderse que su uso se haya extendido tan rápidamente.

Existen muchas variantes en el diseño de las bombas centrífugas. Diseñada originalmente para que fuese instalada en el terreno o en un lugar próximo a éste, para operar por succión o en conjunto con otras bombas, pronto fue adaptada para colocarla bajo el agua en los pozos, en un principio mediante largas extensiones de eje dentro de grandes cajones sumergidos y posteriormente en la forma compacta de la conocida bomba de pozo profundo del tipo de turbina vertical.

Principio en que se Basa la Bomba Centrífuga

Los principios básicos en que se basa el funcionamiento de la bomba centrífuga pueden comprenderse mejor si se considera el efecto que se produce al hacer girar un cubo de agua atado al extremo de una cuerda. La fuerza centrífuga causa que el agua se comprima contra el fondo del cubo, en lugar de escaparse por el extremo abierto. Si en el fondo del cubo se perforase un agujero, el agua escaparía por éste con una velocidad que sería proporcional a la fuerza centrífuga. Aún más, si un tubo de toma pudiese conectarse a una tapa hermética colocada en la boca del cubo se crearía un vacío parcial dentro de éste conforme el agua va siendo descargada. Este vacío podría hacer llegar más agua al cubo desde una alimentación situada en el otro extremo del tubo, siempre que la altura de elevación no fuese muy grande.

Esta descripción tan sencilla satisface todos los requisitos del bombeo mediante acción centrífuga. El cubo y la tapa representan la carcasa de la bomba; el orificio de descarga y el tubo de toma corresponden respectivamente a la salida y entrada de la bomba; la cuerda y el brazo que hacen girar en círculos al cubo realizan la función del impulsor de la bomba.

La carga contra la cual opera la bomba centrífuga es una función de la velocidad del agua. Esta carga se calcula mediante la fórmula fundamental de la hidráulica $h = V^2/2g$, en la cual h es la carga que se produce, V es la velocidad del agua y g, la aceleración de la gravedad. La velocidad es la misma que la de la periferia del impulsor, la que a su vez es igual al producto de la circunferencia de éste por el número de revoluciones por minuto.

La cantidad de agua que puede bombearse, aumenta con el tamaño de la entrada y de los pasajes de los impulsores, teniendo en cuenta, claro está, las pérdidas debidas a fricción, turbulencia y otros factores semejantes.

A una velocidad determinada y bajo condiciones ideales, la cantidad bombeada varía en relación directa con el diámetro del impulsor; la carga total contra la cual puede ser bombeada el agua, varía con el cuadrado del diámetro; y la potencia necesaria, lo hace proporcionalmente a la tercera potencia del diámetro del impulsor.

La Fig. 347 corresponde a una gráfica característica de bomba, con curvas típicas interrelacionadas que se refieren a una bomba centrífuga de una sola etapa y en la cual se indica la cantidad de agua que puede ser bombeada contra cierto rango de carga total, la potencia necesaria y la eficiencia de la bomba, para cualquier punto dentro de ese rango y cuando la bomba funciona a cierta velocidad dada.

Tal como lo indica la línea interrumpida de este diagrama, esta bomba en particular puede bombear un caudal de 227 m³/hora contra una carga total de aproximadamente 27 m., a una eficiencia del 82 por ciento, necesitando para ello, en estas condiciones, una potencia de 28 CV.

Carga de Cierre

Si a una bomba que utilizase este impulsor, se le cerrase la descarga mediante una válvula, de modo que no existiese caudal alguno, la carga de cierre que la bomba llegaría a levantar, sería de 32 m., y la potencia al freno consumida, alcanzaría a unos 12 CV. Una bomba centrífuga puede funcionar a la presión de cierre solamente durante un período de tiempo limitado, porque el calor que se genera por la turbulencia creada, podría dañarla. Cuanto menor el volumen de agua y la superficie expuesta que la contiene, así como cuánto mayor la velocidad del impulsor, más corto será el período durante el cual la bomba podría operar sin peligro, a la presión de cierre.

El diagrama muestra también que cuando esta bomba funciona contra una carga de 21 m., la cantidad de agua descargada aumenta hasta casi 330 m³/hora, disminuyendo la eficiencia hasta un 76 por ciento y necesitándose una potencia al freno de 35 CV.

Las características de funcionamiento pueden cambiarse mediante modificaciones del diseño. Existen cinco diferentes tipos de diseño de bombas centrífugas, cada uno de los cuales puede modificarse, dentro de ciertos límites, cambiando el diseño de la cámara o del impulsor, obteniendo así diferentes características de comportamiento. Estos son:

1. Bomba de voluta.
2. Bomba turbina o de difusor.
3. Bomba de escurrimiento mixto.
4. Bomba de escurrimiento axial (hélice).
5. Bomba regenerativa.

El tipo de voluta se caracteriza por no tener paletas difusoras.

El rotor está contenido en una carcasa que tiene la forma de una espiral, y en la cual la velocidad del agua se reduce cuando ésta abandona el impulsor, dando por resultado un aumento en la presión.

En la bomba del tipo de turbina, el impulsor se halla rodeado por paletas difusoras las cuales proveen pasajes que se ensanchan gradualmente haciendo que la velocidad del agua que abandona el impulsor, se reduzca gradualmente transformándose así la carga de velocidad en carga de presión.

La elección entre estos dos tipos depende del uso que se pretenda. Por lo general, se prefiere el tipo de voluta en las instalaciones de gran capacidad y baja carga, y el de turbina, cuando se requiere elevar el agua a grandes alturas. El tipo de turbina se utiliza en los pozos de agua cuando las cargas de elevación son grandes, debido a las ventajas

de su diseño cuando el diámetro de la bomba está limitado. Debido a la preponderancia que ha tomado este tipo de bomba en las instalaciones de gran altura de elevación, el término "bomba de turbina" se ha venido aplicando a todas las bombas centrífugas que se usan de esta manera, sin importar si son verdaderamente turbinas o no.

Las bombas centrífugas de escurrimiento mixto, utilizan tanto la fuerza centrífuga como cierta acción propulsora de una hélice, para desplazar el agua. Estas bombas se usan extensamente en instalaciones de gran capacidad que operan contra cargas de bombeo relativamente bajas.

Las bombas de escurrimiento axial se denominan a menudo bombas de hélice, porque la mayor parte del flujo se produce por la acción propulsora del elemento helicoidal. Estas se utilizan casi solamente para el bombeo de grandes descargas contra cargas o elevaciones muy bajas.

En la Fig. 350 se muestra un impulsor característico de una bomba del tipo regenerativo. Las características de funcionamiento de este tipo de bomba se hallan entre las de la centrífuga y las de la rotatoria. El juego o tolerancia que tiene el impulsor dentro de la carcasa limita el uso de esta bomba a líquidos que se encuentren relativamente limpios, y su semejanza con la bomba rotatoria se deduce por la marcada pendiente de la curva característica de presiones que desarrolla. La eficiencia de este tipo de bombas es comparativamente baja, pero a su vez, resulta superior a otros tipos, en muchas aplicaciones de reducida capacidad y gran altura de elevación. Su mayor ventaja sobre otras bombas de desplazamiento positivo estriba en que posee una carga de cierre bien definida, de modo que puede funcionar en ciertas situaciones de emergencia sin necesidad de un sistema de alivio.

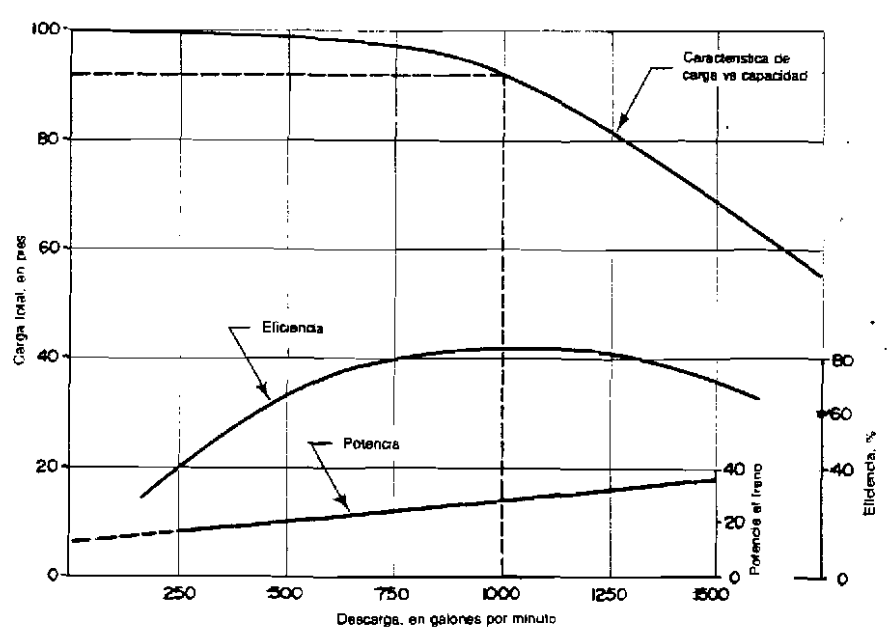


Fig. 347: Curvas características de funcionamiento de una bomba de turbina vertical de una sola etapa, a velocidad de 1,700 revoluciones por minuto. La curva de carga-caudal de esta bomba, es relativamente plana, lo que significa que pequeñas variaciones de la carga inducen cambios considerables en la descarga o caudal de bombeo.

Los impulsores de las bombas centrífugas pueden modificarse de diversas maneras. Una de estas es cambiando la forma de los difusores para producir así diferentes características de bombeo; otro procedimiento consiste en encerrar las paletas; una tercera manera es el método de contrarrestar el empuje y, como cuarta alternativa, está la forma de sellar la carcasa de la bomba.

El Diseño del Impulsor Afecta el Funcionamiento

El principio hidráulico fundamental que se busca satisfacer con el diseño de un impulsor es el de producir una alta velocidad y la transformación parcial de esta última en carga de presión, de acuerdo con la relación expresada por la fórmula siguiente: $h = V^2/2g$. Efectuando cambios en la forma de las aspas se obtienen diferentes características.

Aumentando el diámetro del ojo de entrada del rotor y el espesor de éste, se logra aumentar la cantidad de agua que la bomba puede descargar contra una elevación determinada.

El impulsor "abierto" contiene una serie de aspas curvas soportadas sólo parcialmente y comúnmente se usa para fines tales como el bombeo de desechos de aguas negras o de líquidos que acarreen gran cantidad de sólidos. Al no existir un juego ajustado o restricción de los pasajes, esta disposición resulta más favorable en tales servicios, pues evita la obstrucción.

Al agregar un plato se le brinda soporte a las aspas y se mejora el funcionamiento, pues éstas pueden ser más delgadas. El diseño puede aún perfeccionarse para lograr un flujo hidrodinámico a la salida de las aspas si se agrega un aro de refuerzo, en el lado de éstas, obteniendo de este modo un impulsor completamente cerrado.

Cuando el flujo hace su entrada por un lado del impulsor, se desarrolla un empuje que debe contrarrestarse hidráulica o mecánicamente. Por lo general se utilizan dos procedimientos para balancear el empuje en las bombas centrífugas, siendo el primero el empleo de impulsores de dobe succión, en el cual el agua penetra en igual cantidad por ambos lados; o también adoptando un sistema de montaje de los impulsores, que consiste en adosar éstos dorso contra dorso y en pares, como en las bombas de múltiples etapas. En ambos casos, el empuje queda balanceado hidráulicamente. En la mayor parte de las bombas centrífugas, incluyendo

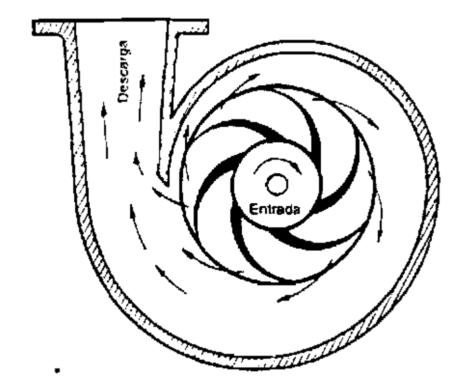


Fig. 348: La bomba centrífuga del tipo de voluta no contiene paletas difusoras o guías.

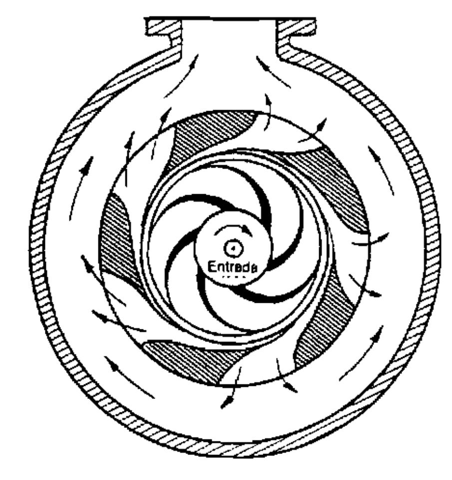


Fig. 349: En la bomba del tipo de turbina, el agua que sale del impulsor se desplaza a través de pasajes curvos situados entre las paletas difusoras.

las turbinas verticales, el efecto mencionado se contrarrestra mediante el empleo de cojinetes de empuje.

Puesto que la pérdida de agua en la zona de entrada de un impulsor, desde el lado de alta presión hacia el área en que ésta es menor, produce una pérdida de energía (menor eficiencia) se provee un sello anular entre el impulsor y la carcasa de la bomba. Estos anillos pueden variar desde un delgado empaque muy ajustado a un anillo muy elaborado.

El número de paletas que se utilice en un impulsor depende de las características del servicio que se vaya a necesitar. Por lo general, puede decirse que cuanto más grande la carga, mayor el número de aquéllas; y a mayor descarga, menor el número de paletas. Con muy pocas paletas no se logra guiar correctamente el agua; cuando éstas son muchas, se puede causar una excesiva resistencia por fricción. Tres paletas constituyen por lo general un mínimo, y el máximo no debe pasar de doce, excepto en los tipos regenerativos de bomba.

Las características que exhibe una bomba de múltiples etapas y de un tipo dado de impulsor son las siguientes:

1. La capacidad de carga y los requisitos de potencia aumentan en proporeión directa con el número de etapas (impulsores).

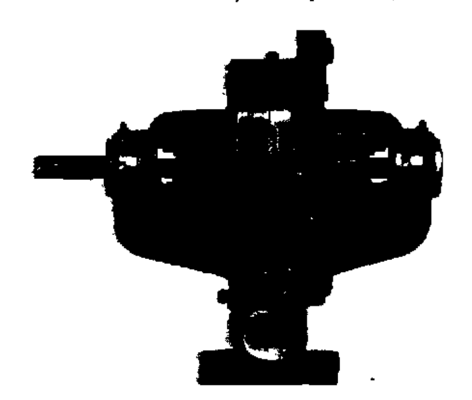


Fig. 350: Bomba centrífuga del tipo regenerativo, en la que se muestra el diseño del impulsor.
(Cortesía de Fairbanks-Morse Division)

2. La capacidad volumétrica y la eficiencia son casi las mismas si la bomba funciona con una sola etapa.

En las bombas, tanto horizontales como verticales, el empleo de múltiples impulsores o etapas constituye una práctica regular para poder obtener la capacidad necesaria cuando se bombea contra grandes elevaciones. No pocas veces se arman bombas hasta con 20 etapas y más. Sin embargo, la necesidad de que el eje permanezca alineado, le impone



Fig. 351: (Izquierda) Impulsor semi-abierto. (Derecha) Impulsor completamente cerrado, de una bomba del tipo de turbina.
(Cortesía de Goulds Pumps, Inc.

un límite a la longitud de una sola sarta de impulsores. Algunos otros componentes deberán también estar en condiciones de soportar los esfuerzos elevados que se desarrollan cuando la bomba funciona contra cargas altas.

Bombas Auto-Cebantes

Aunque las bombas de desplazamiento positivo, especialmente las de pistón, pueden desplazarse y comprimir todos los fluidos, incluso el aire, las bombas centrífugas son de capacidad muy limitada para lograr lo mismo. Como resultado de ello, las bombas de desplazamiento positivo deben cebarse únicamente lo necesario para sellar los escapes de los pistones, válvulas u otras partes activas, en tanto que para desplazar el aire en las bombas centrífugas, se necesita cebar éstas muchísimo más.

Se emplean diversos dispositivos y procedimientos para mantener cebadas las bombas centrífugas; la literatura que trata de esto es muy extensa. Sin embargo, se podría decir que por lo general interviene alguno de los siguientes factores, o una combinación de éstos: (1) una válvula de pie para retener el agua en la bomba; (2) algún medio de ventilación que elimine el aire atrapado; (3) un dispositivo auxiliar de bombeo para poder llenar con agua tanto la bomba centrífuga como la tubería de toma; (4) una conexión a una fuente externa de agua a presión, para alimentar la bomba; (5) utilizar una fabricación autocebante. La construcción autocebante almacena agua con ese propósito dentro de una cámara auxiliar que se halla incorporada a la estructura de la bomba de un modo tal, que el aire atrapado va siendo expelido conforme la bomba hace circular el agua para cebar.

Bombas de Motor Sumergido

La bomba de motor sumergido constituye uno de los descubrimientos más recientes. Esta consiste de una bomba centrífuga acoplada en forma ajustada a un motor que puede funcionar sumergido en el agua. El motor se halla situado, por lo general, por debajo de la toma de la bomba. No obstante que este tipo de bomba se ha venido construyendo por alrededor de 50 años, no es sino hasta los últimos 15 años que se ha utilizado extensamente en los pozos de agua. Su mayor uso se debe al perfeccionamiento de los motores, cables eléctricos y sellos herméticos impermeables que se pueden usar dentro del agua. Hoy día, constituye una práctica muy común el sumergir estos motores a profundidades de hasta 150 metros, lo que los somete a presiones estáticas superiores a 14 kg/cm².

La ventaja primordial de las bombas de motor sumergido es la de la eliminación del largo eje impulsor y de sus dispositivos de guía que se necesitan en las bombas convencionales de turbina vertical, que son impulsadas por un motor situado en la superficie del terreno. Cuando se utilizan bombas de motor sumergido, se reducen los costos de la casa de bombas. Estas bombas, a su vez, resultan menos afectadas por las desviaciones que pudiesen existir en el alineamiento del pozo.

Bombas de Eyector o Chorro

La clase de bomba que se conoce generalmente como bomba de eyector o de chorro viene a ser en realidad una combinación de un eyector y de una bomba

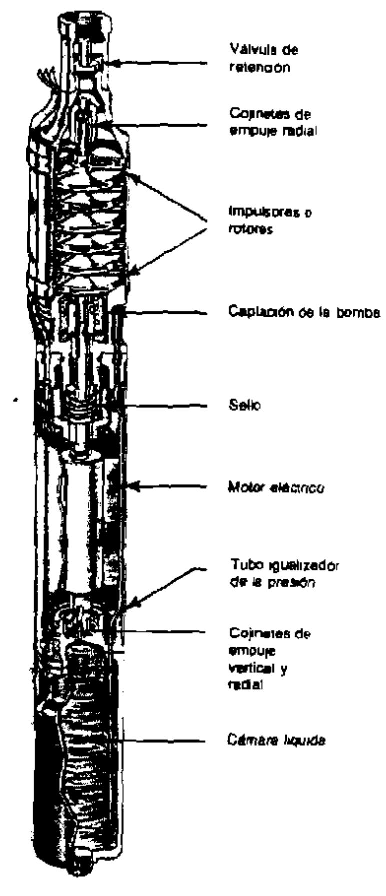


Fig. 352: Vista descarnada de una bomba turbina con motor eléctrico sumergible.
(Cortesía de The F. E. Myers & Bro. Co.)

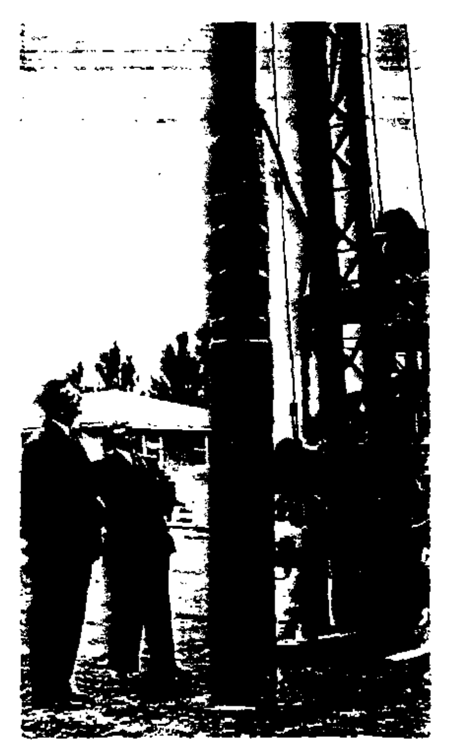


Fig. 353: Una bomba turbina de motor sumergido, con capacidad de 340 m³/hora, cuando era instalada en un lugar de Nueva Zelandia.

centrífuga. Los eyectores se utilizan en la marina, en la generación de vapor, y en forma semejante para servicios tales como el de achicar y alimentar calderas. Los eyectores no tienen una aplicación directa en el bombeo de agua de pozos, excepto cuando se usan en combinación con una bomba centrífuga, para constituir una bomba de eyector o chorro.

La Fig. 354 ilustra los componentes esenciales de un tubo y boquilla de venturi, y el principio en que se basa el funcionamiento de un eyector. El agua a presión descarga a través de una boquilla colocada por dentro de un tubo que conduce el agua. La conformación de la boquilla se hace de modo que el área a través de la cual debe pasar el flujo, se reduzca en vez de abruptamente, en una forma gradual, logrando así que se aumente la velocidad del flujo. De acuerdo con una ley física, establecida por Bernouilli, la presión del agua dentro de una tubería disminuye en relación directa con el aumento en la velocidad del flujo y vice-versa. Esto es, si debido a una reducción del área de flujo, la velocidad aumenta en cualquier punto, tal como ocurriría en el punto *a* próximo a la boquilla mostrada en la Fig. 354, se producirá por lo tanto una disminución proporcional de la presión en ese punto.

Si la velocidad de descarga en la boquilla es suficientemente grande, la presión en el punto *a* descenderá lo bastante como para atraer agua hacia el dispositivo de venturi a través de la abertura situada en ese punto, aumentando así el volumen total de agua que fluye hacia adelante del punto *a*.

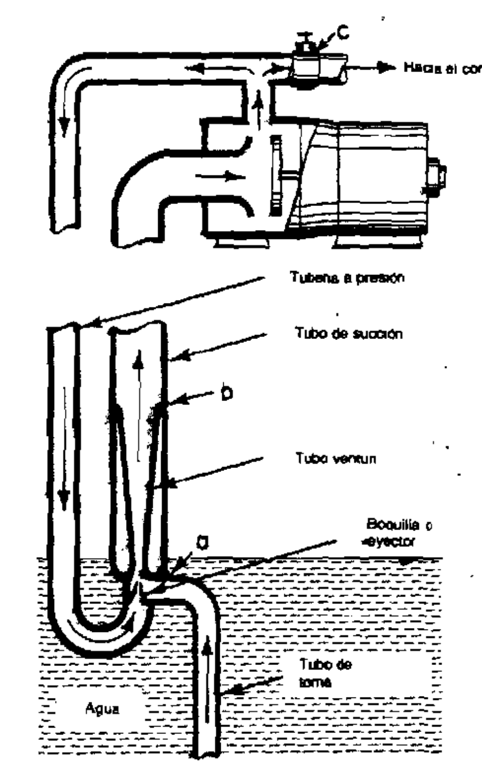


Fig. 354: Principios en que se basa el funcionamiento de una bomba de eyector.

El aumento gradual que experimenta el tubo venturi hasta alcanzar el tamaño del diámetro de la tubería, reduce la velocidad con un mínimo de turbulencia y se recupera la presión en el punto *b*, descontadas, claro está, las pérdidas de carga debidas a la fricción.

En una bomba de eyector, la bomba centrífuga es el elemento motriz que induce el flujo a través de la boquilla y proporciona el escurrimiento combinado dentro del tubo de toma que se encuentra por delante de ésta. Este flujo combinado está formado por el agua en circulación y la que ha sido tomada del pozo, en el punto *a*. El incremento adicional de agua que se obtiene del pozo pasa por la válvula de regulación situada en el punto *c* prosiguiendo hasta el lugar de consumo o almacenamiento, en tanto que el volumen requerido para producir el flujo, se hace recircular a través del tubo de presión.

La válvula de regulación se ajusta de modo de mantener la presión necesaria para que se produzca el flujo a la carga existente de bombeo. Esto puede lograrse automáticamente o a mano. No deberá circular agua a través de esta válvula, hasta que pase la suficiente por el tubo de presión y se produzca la presión necesaria en la boquilla.

Para aumentar la altura de elevación en la descarga, la energía desarrollada por la bomba deberá también aumentar. Esto se logra agregando etapas a la bomba centrífuga con lo que se aumenta la presión y la potencia en proporción directa al número de impulsores, permaneciendo constante el caudal.

El dispositivo eyector también puede ser instalado junto a la entrada de una instalación de succión. Con esto se logra aumentar la capacidad de aspiración hasta un punto mucho más allá de lo que en la práctica se consigue con la bomba centrífuga convencional.

Las bombas de eyector son por naturaleza ineficientes, pero en la mayoría de los casos esto no resulta objetable, incluso en muchas instalaciones domiciliarias, por las otras características favorables que ofrecen, tales como:

1. Adaptabilidad a pozos pequeños, hasta de 5 cm. de diámetro interior, en instalaciones de gran profundidad.
2. Acceso a todas las partes móviles en la superficie del terreno.
3. Simplicidad, combinada con una inversión inicial y un mantenimiento de bajo costo.
4. Adaptabilidad para ser instaladas con sus partes móviles fuera del pozo.

En algunos lugares en donde los niveles de agua están sujetos a grandes variaciones estacionales, o cuando una severa corrosión o incrustación causan la obstrucción de la boquilla, las bombas de eyector han demostrado no ser plenamente satisfactorias.

Bombeo por Inyección de Aire

Se puede bombear agua de un pozo si se dispone de algún medio para introducir aire comprimido dentro de una tubería que se haya hecho descender en aquél. Las burbujas de aire se mezclan con el agua reduciéndose así la gravedad específica de la columna líquida, en la cantidad suficiente como para poder elevar ésta hasta la superficie. La Fig. 355 muestra una disposición para lograr la elevación por aire. Debido a su baja eficiencia y a las limitaciones de este método de bombeo, rara vez se utiliza como instalación permanente. Cuando se emplea de esta manera, es por alguna razón especial tal como la necesidad de aireación para la eliminación de algún gas inconveniente, o por la presencia de alguna agua altamente corrosiva o abrasiva que destruiría las partes de cualquier bomba que se sumergiera en ella.

Ya que una altura adicional de elevación afecta desfavorablemente el funcionamiento de cualquier sistema de bombeo por inyección de aire, el agua se suele descargar

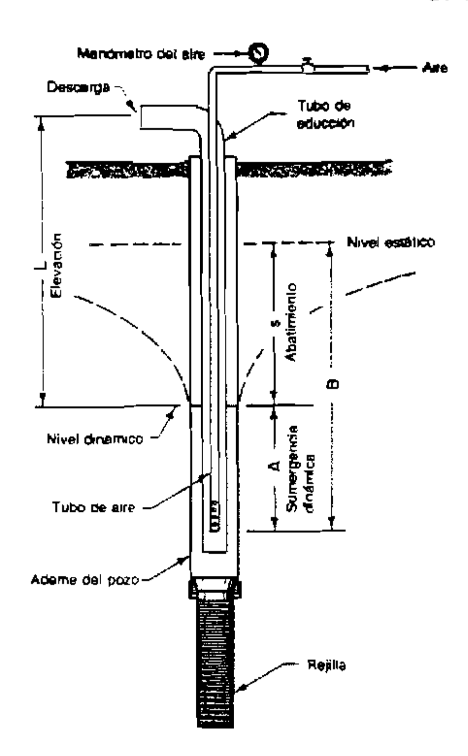


Fig. 355: La operación por aire comprimido y sus resultados, varían con la carga total de elevación y con la sumergencia que se le dé al tubo de inyección de aire por debajo del nivel dinámico.

al nivel más bajo posible usando luego para la elevación, un equipo de rebombeo. Se necesita instalar un tanque de tamaño suficiente entre el dispositivo de inyección y la unidad de rebombeo, para la eliminación del aire y la amortiguación de las oleadas de agua.

Sin embargo, el bombeo por inyección de aire se utiliza más que ampliamente en el desarrollo y prueba preliminar de los pozos. Puede resultar eficaz en los pozos en que prevalecen condiciones favorables. A menudo, se usa también como un medio conveniente de bombear un pozo, conjuntamente con el empleo del método de desarrollo, por chorros de agua a alta velocidad.

Las condiciones de uso y el instrumental necesario han sido discutidos en el Capítulo 14, en las páginas 350 y 351.

La gráfica de la Fig. 356 indica los litros por minuto que pueden ser bombeados por cada metro cúbico de aire libre por minuto, cuando se conocen la elevación total y la sumergencia disponible.

La Tabla XXX, página 351 del Capítulo 14, suministra una lista de los tamaños más apropiados de tubería de educción e inyección de aire, para la extracción de varios caudales con un dispositivo de bombeo por inyección de aire.

Elección de la Bomba

Antes de que pueda elegirse con buen criterio la bomba que se necesita en una instalación, es indispensable contar con datos concretos referentes a la capacidad que se desea, localización y condiciones de funcionamiento y carga total de bombeo. Solamente cuando se tengan a mano estos datos, se puede proceder a escoger el tipo, clase y tamaño de la bomba.

La necesidad de conocer la capacidad que se requiere es obvia; sin embargo, muy a menudo sucede que factores tales como las variaciones de la demanda, las cargas máximas, la carga dinámica y las necesidades futuras, no se verifican cuidadosamente.

La localización y las condiciones de funcionamiento pueden afectar grandemente la elección de la bomba, por circunstancias tales como la disponibilidad de energía, temperatura, portección de la intemperie, necesidad eventual de retirar la bomba del pozo, o contaminación por materiales corrosivos o abrasivos.

La carga total de bombeo debe siempre determinarse en la forma más exacta que sea posible, para asegurarse de la capacidad necesaria, y para poder calcular la potencia requerida. La carga total de bombeo se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$h_t = h_e + h_f + h_v$$

en la cual:

h_t = carga dinámica total, en metros.
h_e = altura estática de elevación, desde el nivel dinámico o de bombeo en el pozo, hasta el punto en que se va a llevar el agua, en metros.
h_f = pérdida total por fricción, expresada en metros.
h_v = carga de velocidad, en metros; o sea, la carga para poner en movimiento el agua.

Cuando la bomba actúa contra un sistema a presión, en lugar de sencillamente elevar el agua hasta un tanque de almacenamiento, la carga total de elevación, h_e, viene a ser la suma de la distancia vertical entre el nivel dinámico o de bombeo dentro del pozo, hasta la descarga de la bomba, más la carga hidrostática de presión sobre ese mismo punto.

La carga de velocidad se determina mediante la fórmula $h = 0.051\ V^2$ (estando h en metros y V en metros por segundo). Por lo general su magnitud es pequeña y sólo se toma en cuenta en aquellas instalaciones que tienen un gran volumen de descarga y una pequeña altura de elevación y presión de descarga, o cuando la velocidad del flujo es excesivamente alta. Si ésta es de unos 1.80 m/s (corrientemente la máxima), la carga de velocidad es de alrededor de 0.18 m.

La Tabla XXXVIII y XXXIX del Apéndice son tabulaciones muy útiles de pérdidas de presión por fricción, en tubería y accesorios.

El trabajo útil desarrollado por una bomba, es equivalente al producto del caudal de bombeo por la carga dinámica total contra la cual funciona la bomba. La medida de este trabajo se expresa como potencia hidráulica y viene dada en caballos de vapor, CV o en vatios, cuyo símbolo es el de W. Como un trabajo de 75 kilogramos-metro por segundo equivale a 1 caballo de vapor, el peso del agua elevado por segundo, multiplicado por la altura manométrica, expresada en metros, y dividido por 75, permite obtener la potencia hidráulica generada por la bomba. Si la descarga Q se expresa en litros por segundo, y la carga dinámica total, h_t, en metros, tendremos que la potencia viene dada por la expresión:

$$CVH = Q \times h_t / 75$$

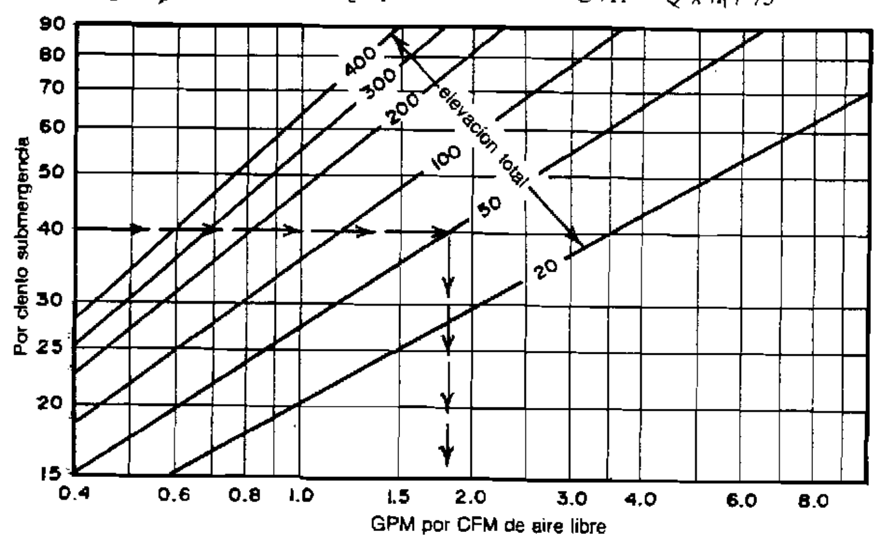


Fig. 356: Relaciones entre elevación total, sumergencia de la línea de aire y agua descargada por pie³ de aire libre suministrado por el compresor en una instalación correctamente diseñada.

Puesto que la máquina tiene una eficiencia menor de 100 por ciento, se requerirá una potencia algo mayor para impulsar la bomba. De este modo, la potencia mecánica necesaria está dada por la expresión:

$$CVF = Q \times h_t / 75\ e$$

en la que las cantidades tienen las mismas unidades de la expresión anterior y e es la eficiencia en decimal.

La potencia eléctrica requerida por el motor, es igual a lo potencia mecánica dividida por la eficiencia del motor. Para expresarla en kilovatios, se multiplica la potencia que necesita el motor, por 0.746.

La eficiencia global del conjunto motor-bomba, se obtiene al dividir la potencia hidráulica por la potencia eléctrica (utilizada por la bomba), y multiplicando el resultado por 100, para expresarlo en términos de porcentaje.

Cuando se ha determinado el mejor tipo de bomba, con base en los datos de que se dispone, se elegirá una bomba individual que se ajuste en la mejor forma a cada situación. Cuando la fuente de agua corresponde a un pozo, esta elección es particularmente importante debido a las diferencias de carga de bombeo que puedan surgir como consecuencia de variaciones estacionales del nivel estático del agua, descenso temporal del nivel dinámico o de bombeo, resultante de prolongados períodos de bombeo continuo o interferencia producida por otros pozos emplazados en el área. El descenso permanente de la superficie freática o del nivel piezométrico, podría también ocurrir si la extracción de agua del acuífero supera en volumen a la recarga natural que éste puede recibir. Circunstancias de este tipo deben de tenerse en cuenta al elegir el equipo de bombeo de un pozo.

La determinación de la magnitud de las fluctuaciones estacionales, implica la recolección de datos regionales de los registros de que se disponga ya la integración de éstos con los que se obtengan de una

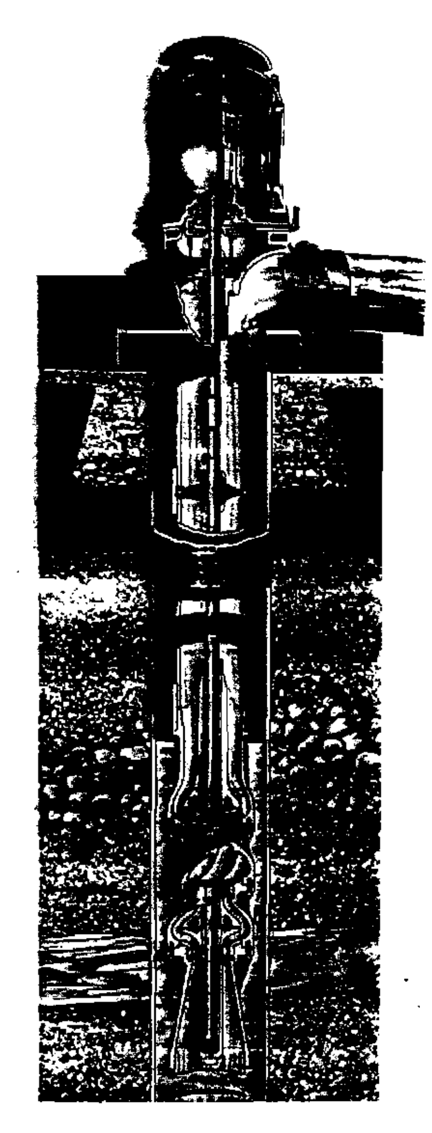


Fig. 357: Bomba turbina vertical de una sola etapa, con cojinetes de eje lubricados por agua.
(Cortesía de Peerless Pump Division)

prueba de bombeo del pozo mismo. La naturaleza y duración de una prueba de bombeo varía grandemente de un caso a otro. Para propósitos de abastecimiento domiciliario, lo que por lo general se necesita es un registro del abatimiento

producido después de probar el pozo por bombeo, durante un período igual o ligeramente mayor al que se vaya a utilizar durante el servicio permanente de la bomba. Tanto el perforador como el que instala la bomba, deberá estar suficientemente familiarizado con las fluctuaciones estacionales, para poder tener en cuenta estos factores cuando se escoge el tamaño de la bomba y la profundidad de su colocación.

En las grandes instalaciones industriales o municipales, se debe estudiar más a fondo la situación. Por lo general, tal estudio comprende pruebas de bombeo realizadas de modo que se puedan determinar las constantes hidráulicas del acuífero, tal como se discutió en el Cap. 6. Teniendo a mano los datos adecuados, se puede luego escoger una bomba que desarrolle un funcionamiento óptimo.

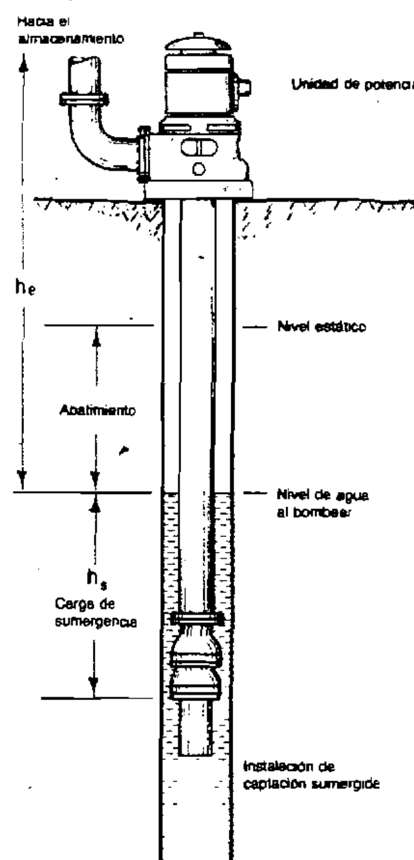


Fig. 358: La carga dinámica total contra la cual actúa una bomba instalada dentro de un pozo, comprende la elevación vertical estatica, h^e, más la fracción correspondiente a pérdidas por friccion y carga de velocidad.

Como ejemplo, y refiriéndonos a las curvas características de bomba, mostradas en la Fig. 347, se puede verificar que se alcanza una eficiencia máxima del 82 por ciento al bombear una descarga de 200 a 250 m³/hora, contra una carga dinámica total de 29 a 27 metros respectivamente. Dentro de ese intervalo, la potencia requerida varía apenas en unos 3 caballos. Sin duda alguna, si las fluctuaciones de carga se hallan dentro de este pequeño rango, esta bomba podría perfectamente escogerse para estos caudales de bombeo.

Por otro parte, bien pudiera suceder que la carga total de bombeo fuese de solamente 18 metros (aún a una mayor descarga) durante una época de nivel elevado del agua o de extracción mínima: en otra fecha sin embargo, la carga dinámica total podría ser de 28.5 metros debido a un descenso del nivel del agua en el acuífero o a una interferencia creciente de los pozos que pudiesen hallarse en la vecindad. En tales condiciones, el caudal de bombeo de esta bomba podría variar desde 360 m³/hora hasta 200 m³/hora. La eficiencia a su vez variaría dentro de un rango de 60 a 82 por ciento, y la potencia necesaria alcanzaría un máximo de aproximadamente 40 CV, y un mínimo de 25CV.

En tal caso debería escogerse sin lugar a dudas, una bomba que ostentara diferentes características, para que se produjeran menores fluctuaciones de la capacidad de bombeo, al existir cambios de la carga total. La bomba que habría que escoger debería mostrar una curva característica de pendiente más pronunciada, y con toda seguridad, estar constituída por dos o más impulsores

(etapas), de modo que la descarga resultase menos afectada por las variaciones de la carga total de bombeo. La eficiencia y la potencia al freno necesarias resultarían a su vez menos afectadas también, dentro del intervalo de variaciones de la carga. Quizá la eficiencia máxima sería menor, pero en promedio resultaría mejor. La potencia consumida por el motor podría permanecer la misma, o incluso ser menor, debido a que la máxima potencia mecánica exigida por la bomba, según la Fig. 347, corresponde a la carga mínima cuando la descarga alcanza su máximo. Un aumento tan grande de la descarga no podría suceder con una bomba que tuviese una curva característica de pendiente más acentuada.

La elección de una bomba para un servicio o aplicación dados, se vuelve más fácil si se traza una curva que represente las pérdidas de carga del sistema hidráulico y se la compara con las curvas características de la bomba. Esta curva se construye para mostrar la carga dinámica requerida en el sistema, para la circulación de diversos caudales de bombeo. Cuando se está bombeando de un pozo, todos los componentes de la carga dinámica total que se anotan en la ecuación de la página 27 de este capítulo, aumentan conforme lo hace la descarga. La elevación vertical aumenta cuando tiene lugar un mayor abatimiento en el pozo: las pérdidas por fricción y la carga de velocidad, también aumentan al hacerse mayor la velocidad en la columna de descarga de la bomba y en otras tuberías.

La forma de la curva de pérdidas de carga en el sistema hidráulico varía con las características hidráulicas del pozo y con las del sistema servido. Una curva relativamente plana es el resultado de la siguiente combinación de factores: alta capacidad específica del pozo, elevación estática constante del punto al cual se hace llegar el agua y tubería de gran diámetro con pequeñas pérdidas por fricción. En cambio, una curva de pendiente relativamente pronunciada es la consecuencia de una baja capacidad específica del pozo y de altas pérdidas de carga por fricción en la tubería.

La Fig. 359 muestra dos curvas características del sistema hidráulico trazadas con los datos de la Tabla XL. Superponiendo sobre el diagrama en referencia, la curva característica de carga-caudal, de una bomba turbina, se puede determinar el punto de funcionamiento de la bomba en el punto de intersección de ambas curvas. De este modo, se pueden superponer diversas curvas características de bomba, para escoger el punto que resulte más favorable a las condiciones del sistema.

Debe recordarse que la bomba funciona

Tabla XL
Ejemplo de Cálculo de la Carga Dinámica Total de un Sistema Hidráulico

Descarga m³/h	Altura Estática (m)	Abatimiento del Pozo (m)		Pérdida Total de Carga por Fricción (m)	Carga Dinámica Total (m)	
		Q/s = 3.78 M³/h/m	Q/s = 15.12 m³/h/m		Q/s = 3.78 m³/h/m	Q/s = 15.12 m³/h/m
0	24.0	0	0	0	24,0	24.0
45,3	24,0	12,0	3,0	0,60	36,6	27.6
90.7	24.0	24,0	6,0	1,80	49,8	31,8
136,0	24,0	36,3	9,3	3,60	63,9	36,9
181,3	24,0	48,6	12,6	5,70	78,3	42,3
226.6	24,0	62,4	15,9	8,70	95,1	48,6

Nota: Qs = capacidad específica del pozo.

solamente a lo largo de su propia curva. Por lo tanto, su punto de intersección con la curva de pérdidas del sistema hidráulico indicará el único caudal posible que la bomba podría suministrar a ese sistema. Este punto puede cambiar solamente si la curva del sistema hidráulico también cambia, o si las características de la bomba varían debido al desgaste o a otros factores.

Al escoger una bomba de turbina, deberán superponerse en la curva de pérdidas de carga del sistema hidráulico, tanto la curva característica de carga-caudal de la bomba, como la de eficiencia. En esta forma se pueden comparar fácilmente las eficiencias de dos o más bombas en sus respectivos puntos de funcionamiento dentro del sistema.

Cuando una bomba empieza a funcionar o se detiene como consecuencia de cambios de presión en el sistema, se necesitan dos curvas para completar el cuadro. Una de éstas representa las condiciones que prevalecen a la presión más baja al principio del ciclo de bombeo, y la otra, la situación a la presión más alta del punto de interrupción. Las dos curvas de pérdidas de carga del sistema, casi paralelas de la Fig. 361, encierran una área dentro de la que caen las condiciones de demanda máxima y mínima.

Estos ejemplos ponen en evidencia la necesidad de determinar con tanta exactitud como sea posible, las variaciones probables de la carga total de bombeo a la descarga que se desea, incluyendo en esta carga total todos los componentes que la integran, como son la carga estática dentro del pozo, el abatimiento producido al bombear, la carga estática por arriba de la bomba, la carga necesaria para vencer la fricción que se

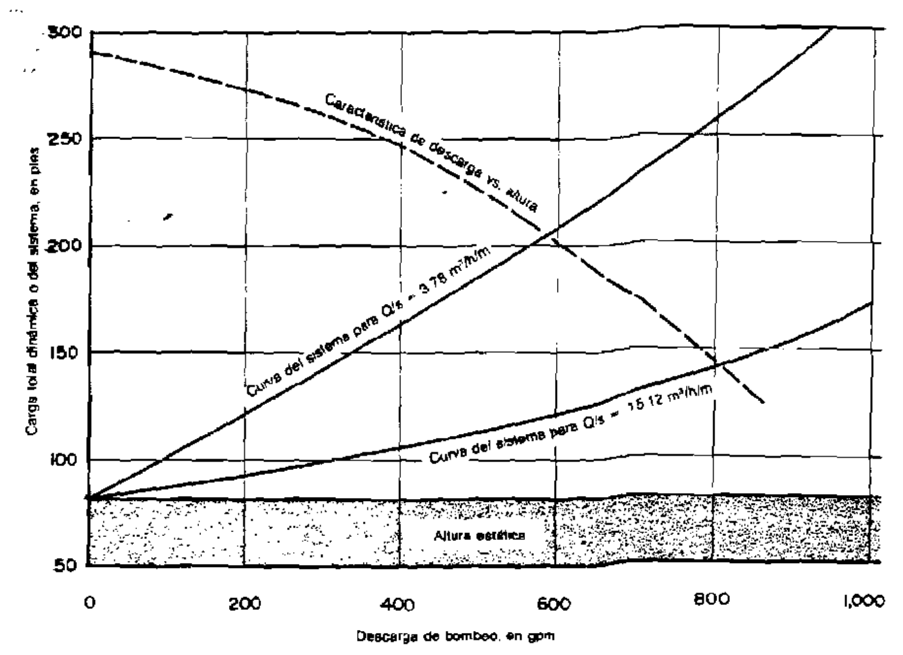


Fig. 359: Las curvas de pérdidas de carga en el sistema hidráulico se obtienen al combinar la carga estática, la carga de fricción en el sistema y el abatimiento dentro del pozo, para cada descarga de bombeo. Al superponer sobre este diagrama la curva característica de carga-capacidad de una bomba turbina cualquiera, se observa que esta bomba estaría en capacidad de suminınstrar alrededor de 135 m³/hora en un caso, o cerca de 182 m³/hora en la eventualidad de que el pozo contara con una mayor capacidad específica. (Q/s = capacidad específica del pozo).

opone al flujo y, en algunos casos, la carga de velocidad.

El método del tanque de gravedad, es el medio más antiguo para disponer de agua a presión en un sistema hidráulico y para proveer de almacenamiento a una reserva. El bombeo directo constituye otra manera de alimentar el sistema y mantener éste sometido a presión, mediante el empleo de una o más bombas gobernadas por lo general en forma automática y conectadas directamente al sistema. Los controles regulan la presión y la alimentación del sistema, aumentado o reduciendo el número de bombas que deben funcionar en un determinado momento.

Sistemas Hidroneumáticos

Los sistemas hidroneumáticos reúnen elementos, tanto de los sistemas por gravedad, como de los de bombeo. Además, permiten bombear intermitentemente y acumular una pequeña cantidad de agua. El funcionamiento de un tanque hidroneumático provee el espacio necesario para los volúmenes adecuados de agua y de aire comprimidos. Estos sistemas son por lo general de tamaño reducido, y rara vez proporcionan descargas superiores a los 6 litros por segundo o almacenamientos mayores de 19,000 litros. En conjunto, sin embargo, existen en servicio millones de estos sistemas. La gran mayoría de los servicios domiciliarios y pequeñas instalaciones comerciales, son de este tipo.



Fig. 360: La prueba precisa del pozo proporciona los datos de abatimiento y descarga necesarios para el cálculo de la curva de pérdidas de carga en el sistema hidráulico.
(Cortesía de Pacific Water Wells, Ltd.)

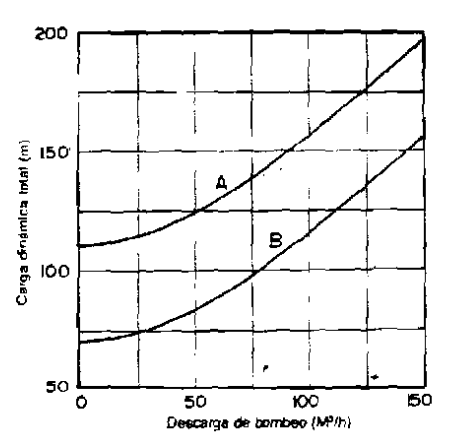


Fig. 361: La curva B de pérdidas en el sistema muestra las condiciones que prevalecen al entrar en funcionamiento el sistema hidroneumático; la curva A indica la situación en el instante de interrumpirse la presión.

El principio básico en que se basan los sistemas hidroneumáticos, consiste en la compresión de aire en la parte superior de un tanque de agua. Tanto la introducción como la extracción del agua, se llevan a cabo por la parte inferior del tanque. Conforme el agua es introducida a éste por bombeo, el aire contenido en la parte superior de la cámara es comprimido hasta alcanzar la presión máxima preestablecida. En ese instante, un interruptor para control de presión detiene el funcionamiento de la bomba. Conforme se va extrayendo agua del tanque, la presión disminuye y la bomba inicia de nuevo su funcionamiento en forma automática, a una presión mínima predeterminada, repitiendo así su ciclo.

Una de las objeciones que se hace a los sistemas hidroneumáticos, es la de la pequeña cantidad de agua que puede obtenerse del intervalo de variación entre los niveles de máxima y mínima presión. Por ejemplo, cuando el aire libre contenido en un tanque de 378 litros es comprimido a 3.5

kg/cm² mediante el bombeo de agua hasta su interior, el tanque llega a admitir alrededor de 295 litros de agua y cerca de 83 litros de aire comprimido. Si se extrae agua hasta que la presión disminuya a 2.1 kg/cm², el volumen que se obtiene así es de apenas unos 42 litros. La manera de aumentar el almacenamiento dentro del intervalo de variación preestablecido de presiones, consiste en precomprimir el aire en el interior del tanque, de modo que se obtenga un mayor volumen de aire en relación al volumen de agua. La cantidad de agua que puede así obtenerse de la reserva, aumenta como en un 10 por ciento por cada décimo de kilogramo por cm², de presión. El volumen de aire puede preservarse ya sea mediante inyección automática de aire durante el bombeo, o por adiciones periódicas. Se dispone de dispositivos de control que permiten limitar el volumen ocupado por el aire, independientemente de la presión.

Referencias

1. "The Vertical Pump," (1954) Johnston Pump Company, Pasadena, California
2. Hicks, Tyler, "Handbook on Pumps," Power, October, 1954, McGraw-Hill Publishing Co., New York
3. Wilson, Warren, "Positive-Displacement Pumps," Power Engineering, June 6, 1960, pp 42-51, Technical Publishing Co., Varrington, Illinois.
4. "Pump Fundamentals," Goulds Pumps, Inc., Seneca Falls, New York
5. Wasson, R. H "Industrial Pump Manual," Vol. 1 & 2, Fairbanks, Morse & Co . Kansas City, Kansas.
6. Daugherty, R L., "Centrifugal Pumps," McGraw-Hill Book Co., New York
7. "American Standard For Vertical Turbine Pumps," AWWA E101-61, American Water Works Assn., New York.
8. "Vertical Turbine Pump Facts," Vertical Turbine Pump Assn., Pasadena, California.

Capitulo 21

Protección Sanitaria de las Reservas de Agua Subterránea

En casi todos los lugares, el agua subterránea en su estado natural es de calidad sanitaria satisfactoria y segura para beber. Esto es particularmente cierto cuando los acuíferos están constituídos por arena.

Sin embargo, algunas fuentes locales de agua subterránea han sido contaminadas como resultado del descuido en las actividades humanas. Una de las causas es el destino equivocado que se les da a los desechos líquidos. Otras consisten en una inadecuada construcción del pozo y en olvidarse de sellar los pozos abandonados. Ello da por resultado el que éstos se conviertan en aberturas potenciales por las cuales puede entrar fácilmente el agua de la superficie a las formaciones subsuperficiales, desvirtuando así la filtración natural que se produce como consecuencia de una lenta percolación a través de los materiales terrestres inalterados.

La provisión de una adecuada protección sanitaria implica todas las medidas que se deben tomar en el diseño y construcción de un pozo para evitar el acceso de sustancias contaminantes al agua que se está bombeando o al acuífero del cual se toma esa agua.

Las prácticas y reglamentaciones adecuadas de construcción de pozos protegen la salud de quienes utilizan el agua, mediante la aplicación de medidas razonables que eviten la contaminación del abastecimiento. En vista de la gran cantidad de pozos que se han construido en las comunidades suburbanas, se ha hecho necesario aplicar medidas protectoras efectivas en la construcción de toda clase de pozos, desde los domiciliarios hasta los municipales e industriales.

Estas medidas de protección varían de acuerdo con las condiciones físicas de los alrededores y con las formaciones geológicas. Dado el amplio margen de variación de estas condiciones, resulta poco práctico establecer especificaciones rígidas de construcción de pozos que sean capaces de ajustarse a cada situación local. Sin embargo, existen ciertas prácticas de construcción que por experiencia se sabe que son adecuadas. Estas prácticas se basan en principios fundamentales que, al adaptarse a

una situación específica, dan como resultado una instalación de buenas condiciones sanitarias a un costo razonable.

Un pozo debe ser localizado a la elevación más alta posible. Por lo tanto, ha de estar indiscutiblemente situado en un terreno más alto que la fuente más próxima de contaminación. El ademe del pozo debe terminar por encima del terreno; y la superficie de éste, en derredor del pozo, debe conformarse de tal modo, que las aguas que escurren se alejen del pozo en todas direcciones.

La localización debe también tener en cuenta el acceso para reparaciones de la bomba, limpieza, tratamiento, pruebas e inspecciones. El extremo superior del pozo no debe quedar situado dentro de ningún sótano ni debajo de un edificio que no tenga sótano. Cuando el pozo se halle situado muy cerca de un edificio, la distancia mínima deberá ser de por lo menos 0.60 m. hacia afuera de cualquier proyección, tal como un voladizo.

La distancia mínima de un pozo a una posible fuente de contaminación deberá ser suficientemente grande como para asegurarse de que cualquier escurrimiento subsuperficial o percolación de agua contaminada, no alcance a llegar al pozo. Las siguientes distancias mínimas, recomendadas por el Departamento de Salud de Iowa, son características de una sana práctica.

Foso común que reciba agua negra cruda .... 30.0 m.
Pozo absorbente, campo de drenaje o pozo negro .... 23.0 m.
Tanque séptico o alcantarillado sanitario de tubos herméticamente acoplados .... 15.0 m.
Alcantarillado sanitario de hierro fundido con acoples de plomo o juntas mecánicas .... 3.0 m.
Alcantarillado sanitario de hierro fundido, con acoples de plomo y recubierto con 15 cm. de concreto .... 1.5 m.

Los corrales deben situarse aguas abajo de los pozos, y alejarse unos 7 a 15 m. de éstos, dependiendo de las condiciones de drenaje.

El recorrido de la contaminación varía grandemente con el carácter de las formaciones del subsuelo. Las separaciones de los pozos, dadas por la tabla anterior, resultan adecuadas cuando los materiales terrestres tienen la capacidad filtrante de la arena.

Cuando el terreno consiste de grava gruesa, caliza o rocas desintegradas cercanas a la superficie, estas distancias no se podrían utilizar. Cuando ciertos materiales del subsuelo tales como los anteriores permiten una rápida percolación del agua, dándole a ésta poca oportunidad de autopurificación, la distancia constituye un factor en el cual se debe confiar con ciertas reservas.

Principios de Construcción

La construcción de un pozo debe planearse y llevarse a cabo, de modo que éste se adapte a las condiciones geológicas e hidrogeológicas que prevalecen en el sitio y aprovechar así en su totalidad, todas las protecciones sanitarias naturales. La instalación deberá diseñarse de modo que se facilite cualquier construcción suplementaria que pudiere llegar a necesitarse para lograr un abastecimiento suficiente y seguro y para preservar el recurso de agua subterránea.

Los siguientes principios deberán tenerse en cuenta al escoger el tipo de pozo que se vaya a construir:

1. El pozo deberá diseñarse de modo que se impida la entrada de agua desde aquellas formaciones que se encuentran o podrían llegar a estar contaminadas, o de formaciones que tengan características indeseables.

2. El pozo deberá diseñarse de manera que no queden alrededor de éste aberturas

que pudieran permitir el acceso vertical, hasta el intervalo de captación del pozo, de agua superficial y agua subterránea contaminada o indeseable.

3. Los materiales que vayan a constituir una parte permanente del pozo, deberán ser durables.

Tubería de Ademe

Al escoger al tipo de tubería de ademe, es necesario considerar los esfuerzos a que ésta va a estar sometida durante la instalación y la corrosividad del agua con la cual va a estar en contacto. Evidentemente, la tubería de hierro fundido o de cobre, no podría hincarse al ser instalada como sucede con el método de perforación por percusión. Los materiales como éstos, resistentes a la corrosión, sólo pueden utilizarse cuando es posible colocarlos libremente dentro del agujero ya perforado.

En la mayoría de los casos, la tubería de acero ha dado resultados satisfactorios. Cuando el suelo o el agua son algo corrosivos, se puede lograr una duración más prolongada, si se utiliza tubería que tenga un espesor mayor de pared. Al escoger tubería para la construcción de pozos domiciliarios, debe de tenerse en cuenta que el espesor de la pared del tubo aumenta con el diámetro del mismo. Por ejemplo, en un tubo estándar de acero de 50 mm. (2 pulgadas), el espesor de la pared es de 3.92 mm. en tanto que en un tubo de 100 mm. de diámetro, la pared tiene un espesor de 6.02 mm.

La tubería hecha de lámina de acero galvanizado no se considera adecuada para ademe de pozo, porque es muy delgada y sus costuras y uniones no son impermeables. El Departamento de Salud de Oklahoma recomienda que cuando se utilice esta tubería, se recubra con 15 cm. de concreto.

Los tubos de concreto o de alcarraza de juntas cortas, que se utilizan en los pozos taladrados, deberán también recubrirse con una pared de concreto de 15 cm. de espesor. Este recubrimiento deberá extenderse hasta una profundidad de 6 m. o más, para lograr un ademe impermeable que impida la entrada de agua de la superficie y de aguas subterráneas someras que pudieran hallarse contaminadas. Si las condiciones del sitio son en extremo desfavorables, el recubrimiento de concreto deberá llevarse hasta una profundidad mayor.

La profundidad adecuada del ademe del pozo constituye un factor importante en la protección sanitaria. Este provee protección vertical como complemento de la separación entre el pozo y alguna posible fuente de contaminación.

Tal principio ha venido siendo aplicado por el Comité de Salud de Wisconsin desde la promulgación de la ley de agua potable del Estado, en 1935. Asociado a otras sanas regulaciones, ha permitido lograr una sustancial mejora de la calidad bacteriológica del agua que se obtiene de pozos municipales y privados.

En el Cap. 10, páginas 235, 236, y 237, se han dado reglas características para establecer las profundidades del ademe y de cementación que deben de utilizarse en ciertos casos. Sin embargo, en los pozos municipales e industriales de gran capacidad, se especifica a menudo una mayor protección vertical.

La mayoria de los Estados exigen que los planos de cada proyecto público o institucional de abastecimiento de agua sean aprobados por el Departamento de Salud del Estado. Todos los detalles de la localización del pozo y de su diseño son verificados para cerciorarse de que cumplan con ciertos requisitos de construcción. Frecuentemente, los requisitos de ubicación son más estrictos que los que se aplican a los pozos de uso privado.

Las exigencias de profundidad de ademe y de cementación, de estas mayores instalaciones, se establecen por lo general en cada caso particular. Se permite un mínimo de 12 metros en condiciones geológicas favorables. Cuando en ciertas formaciones

rocosas, las posibilidades de contaminación son mayores, puede que llegue a necesitarse hasta 150 metros de ademe y aún más.

Cuando se emplea el método de percusión, se perfora primero hasta la profundidad requerida un agujero de mayor diámetro para proveer el espacio necesario para la cementación. El ademe permanente se instala seguidamente en el centro de este agujero perforado. Luego, la tubería se hace descender mediante perforación e hincado. Conforme la operación continúa, el espacio anular de cementación, en torno al ademe correspondiente al agujero perforado superior, debe de mantenerse lleno de lodo arcilloso hasta unas dos terceras partes de su profundidad. Parte de esta pasta arcillosa es arrastrada hacia abajo conforme se va hincando el ademe produciendo cierto efecto sellante alrededor de la tubería y por debajo del espacio de cementación deliberadamente construido.

Este efecto sellante de la arcilla es también importante cuando el ademe es posteriormente retraído hasta colocarlo en su posición final, después de que la rejilla ha sido emplazada a la profundidad deseada. Una vez completada esta etapa, la pasta arcillosa es desplazada al cementarse el ademe mediante alguno de los métodos descritos en el Capítulo 11.

Procedimiento Seguido en los Pozos Perforados por Rotación

Cuando se perfora por el método rotatorio convencional, el procedimiento varía un poco, puesto que el agujero se encuentra lleno de lodo de perforación durante todo el proceso. En estas condiciones puede resultar ventajoso el método telescópico para la instalación de la rejilla. Antes de situar ésta, y tal como fue descrito en el Capitulo 11, el ademe del pozo puede colocarse en su posición permanente y cementarse en sitio. Para alojar la rejilla, se puede perforar dentro del acuífero un agujero de diámetro algo menor que el del ademe. La rejilla es luego instalada por dentro del ademe, siguiendo el método telescópico, evitando

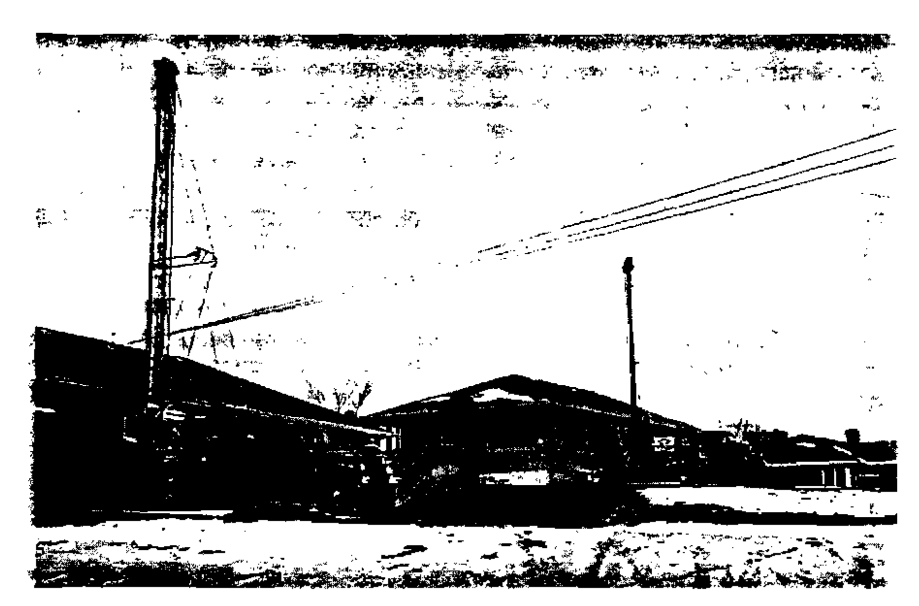


Fig. 362: Miles de viviendas suburbanas obtienen abundantes abastecimientos de agua potable y digna de confianza mediante pozos debidamente construidos dentro de formaciones acuíferas de arena.

así que se altere el material de la cementación.

En casos como éste, el empleo del método telescópico ofrece ciertas ventajas definitivas. El ademe del pozo puede instalarse desde el momento inicial en su posición permanente y cementarse en sitio. Utilizando un trépano menor, se puede perforar un agujero por debajo del ademe, lo que permite colocar la rejilla por dentro de éste, siguiendo el método telescópico.

Cuando se desea perforar en toda la profundidad del agujero para obtener muestras de la formación productora previamente al emplazamiento de la rejilla, el fondo del agujero puede rellenarse con arena antes de tomar las muestras y enseguida colocar el ademe y sellarlo. El relleno provisional de arena puede luego eliminarse usando lodo de perforación de perferencia al agua, para permitir la instalación de la rejilla sin alterar el sello en torno al ademe.

Además de los procedimientos específicos descritos aquí y en el Capítulo 11, pueden utilizarse otros para obtener los resultados apetecidos. El principio consiste en proceder de tal forma que el ademe quede herméticamente sellado en el terreno. El método telescópico de instalación de la rejilla conduce por sí mismo al logro de este objetivo. Además permite la remoción y reinstalación de la misma en el futuro, si ello fuere necesario, sin alterar la impermeabilidad del ademe ni la de las zonas que rodean a éste.

El método telescópico de instalación de rejillas ofrece también ventajas considerables al completar pozos pequeños. A este efecto, compárense por ejemplo, las instalaciones ilustradas en las Figs. 363 y 364.

La Fig. 363 representa una instalación que es aceptada por muchos departamentos estatales de salud. Se puede obtener haciendo descender un tramo de tubo de 3.6 a 4.5 metros de longitud y de 75 a 150 mm. de

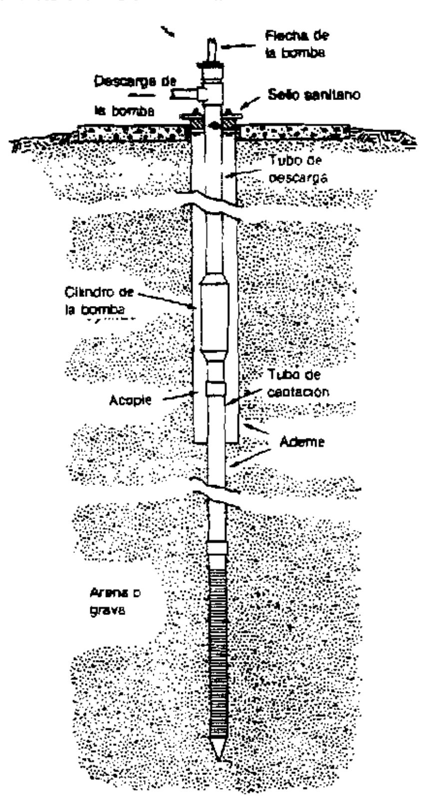


Fig. 363: Puntera con la unidad de bombeo directamente conectada a una parte del ademe.

diámetro. El extremo superior de este tubo deberá sobresalir cuando menos unos 20 cm. por encima de la superficie del terreno. Seguidamente, se hinca una puntera hasta la profundidad que se desee, dentro de la formación acuífera arenosa. Cuando se ha logrado determinar la mejor posición de la puntera, ésta conjuntamente con la tubería de hincado, son retirados y se procede a instalar un acople suelto a una distancia apropiada por sobre la puntera, al cual pueda adaptarse más tarde el dispositivo cilíndrico de bombeo.

Enseguida de esto, la puntera es de nuevo hincada hasta la profundidad apropiada. La sección superior de la tubería de hincado es desconectada desacoplando la unión suelta. A continuación, el cilindro y la tubería de

descarga se hacen bajar dentro del pozo, enroscando el primero de éstos al extremo abierto de la tubería de extensión que había quedado junto con la puntera en la superficie del terreno.

El resto de la unidad de bombeo puede instalarse a continuación. Si la unidad de potencia tiene que ser colocada inmediatamente por encima del pozo, debe de montarse en forma tal que cierre el ademe. Si la instalación va a estar apartada del pozo, deberá adaptarse al ademe una tapa de condiciones sanitarias.

Instalación por el Método Telescópico

La Fig. 364 muestra un tipo mejor de construcción que se puede instalar más rápidamente que el que se acaba de describir. Primeramente se hace descender el ademe hasta una profundidad muy próxima a la cual se va a instalar la puntera dentro de la arena acuífera. Este ademe puede ser de unos 75 a 150 mm. de diámetro, utilizando preferiblemente el tamaño mayor.

Este ademe se limpia completamente hasta el fondo y la puntera se hace descender por dentro, llevándola por fuera del extremo inferior del ademe, hasta introducirla a la profundidad deseada dentro de la arena acuífera. Por conveniencia, se utiliza una corta extensión de tubería colocada por encima de la puntera. En el extremo superior de esta tubería de extensión, se provee un empaque de cierre automático.

A continuación se suspende la unidad de bombeo por dentro del pozo. Si se va a utilizar una bomba de aspiración o de succión, la tubería correspondiente se instala dentro del ademe del pozo hasta la profundidad que se desea.

El costo de un pozo construído en la forma mostrada en la Fig. 364, normalmente no es más alto que el de la instalación del tipo mostrado en la Fig. 363. La inversión en tubería es ligeramente mayor, pero el tiempo y la mano de obra que se necesitan para

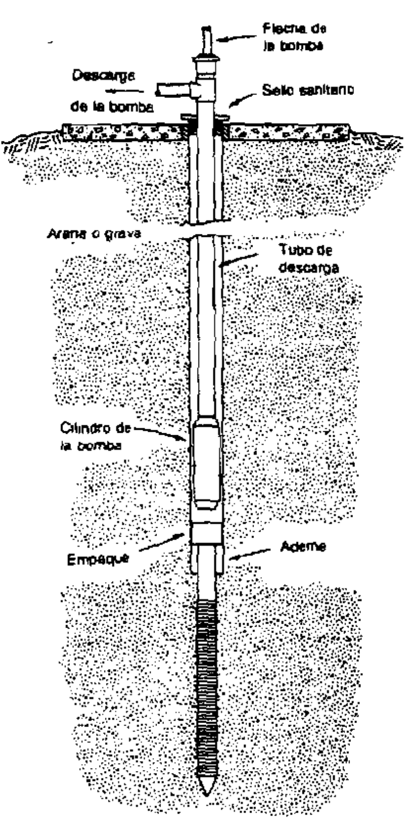


Fig. 364: Puntera con la unidad de bombeo suspendida por dentro del ademe sin hallarse conectada directamente a ninguna parte de éste.

realizar la instalación, son considerablemente menores.

Las desventajas de la instalación mostrada en la Fig. 363, estriban en que el acople roscado que conecta el cilindro de la bomba a la tubería de extensión, por encima de la puntera, no es impermeable, y que la considerable longitud de tubería que se extiende desde la puntera hasta el cilindro de la bomba, sirve tanto como ademe para el intervalo inferior del pozo como de tubería de aspiración para la bomba. Cuando la bomba se encuentra en funcionamiento, esta tubería se halla sometida a una presión negativa, o sea, menor que la atmosférica. Cualquier agua contaminada que pudiese

hallarse dentro de la formación precisamente en el fondo del ademe superior, podría ser atraída hacia la bomba a través de cualquier abertura que se desarrollase en la tubería de aspiración.

Como regla general, no constituye una buena práctica someter a presión negativa ninguna parte del ademe, excepto en aquellas profundidades que se hallan muy por debajo de los niveles en donde podría aparecer agua contaminada.

Si se construye un pozo siguiendo los lineamientos dados por la Fig. 363, y la unidad de bombeo se coloca en la superficie del terreno, en lugar de a cierta profundidad por debajo de éste, toda la tubería de extensión constituye el tubo de succión de la bomba. Siempre que la bomba se halle en operación, este tubo estará sometido a presión negativa.

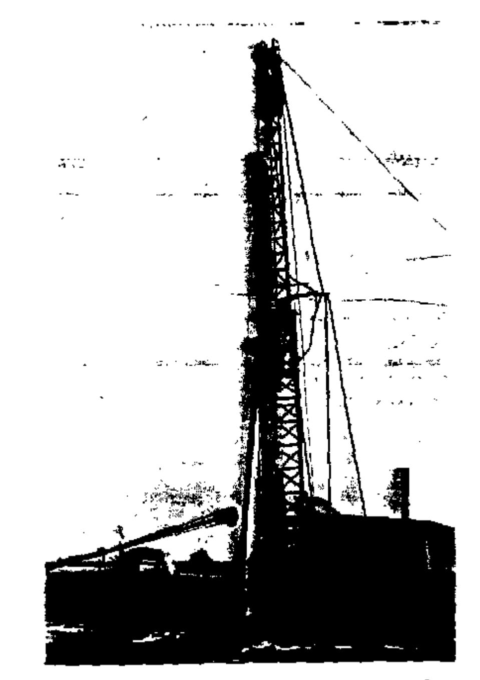


Fig. 365: Una rejilla Johnson para pozo cuando era instalada por el método telescópico en un pozo municipal de la localidad de Plymouth, Michigan, que produjo 795 m³/h. a un abatimiento de 8.23 m.
(Cortesía de Dunbar Drilling, Inc.)

El espacio anular comprendido entre el ademe superior del pozo y esta tubería de succión, quedará abierto a menos que se tomen las medidas para sellarlo. Pareciera que es conveniente sellar todo el espacio comprendido entre el ademe y la tubería de succión de la bomba, cuando esta última es del tipo de aspiración. La pasta de arcilla podría proveer un sello adecuado del espacio anular descrito.

La principal ventaja del tipo de construcción mostrado en la Fig. 364, estriba en que ninguna parte del ademe del pozo podría hallarse sometido a presión negativa. Ninguna sección de la tubería de aspiración de la bomba, sirve al doble propósito de tubo de succión y de ademe.

Debe destacarse el hecho de que muchas personas, al referirse al tipo de construcción mostrado en la Fig. 363, lo hacen como si éste fuese el de un pozo doblemente ademado. La terminología empleada es imprecisa. El tubo de pequeño diámetro conectado al extremo superior del cilindro de la bomba, que corrientemente se describe como un ademe interior, es en realidad parte de la bomba. La que conduce el agua a presión hasta la superficie del terreno, es la tubería de descarga de la bomba. Esta, en ningún momento, podría considerarse como tubería de ademe.

Por lo tanto, la tubería de mayor diámetro situada en la parte superior del pozo, es, en estricto sentido, el único ademe de este intervalo del pozo. Por debajo de esta sección de ademe, la tubería de menor diámetro que se extiende por abajo hasta el extremo superior de la puntera, desempeña la función de ademe para la parte inferior del pozo. No obstante, como y lo hemos visto, esta tubería sirve a un doble propósito, puesto que al mismo tiempo viene a ser la tubería de aspiración de la bomba.

En el pozo mostrado en la Fig. 364, el ademe del pozo se distingue claramente de la tubería que pertenece específicamente a la instalación de la bomba.

Tuberías Horizontales de Aspiración

Esta discusión sobre la protección sanitaria de los pozos, nos lleva necesariamente a considerar la que debe darse a las tuberías horizontales de succión, cuando la bomba se va a instalar a cierta distancia del pozo en lugar de colocarla por dentro o directamente encima de éste.

Los requisitos establecidos por el Departamento de Salud del Estado de Michigan, son los que corresponden a una buena práctica. No se exige ninguna protección especial cuando la tubería de succión se tiende por arriba de la superficie del terreno o cuando se halla expuesta dentro de un sótano aceptado que tenga buen drenaje, siempre que la tubería se encuentre por lo menos a 30 cm. sobre el piso del sótano. Las regulaciones de Michigan también permiten que la tubería de succión sea enterrada siempre que se halle a 30 cm. por lo menos de la superficie del terreno circundante y que se proteja contra inundaciones. Esto último significa que la tubería podría instalarse a 30 cm. por encima de la superficie original del terreno, apilando luego tierra para enterrarla.

En Michigan, todas las tuberías horizontales de succión que se instalen por debajo de la superficie, deben colocarse por dentro de un ducto protector exterior. El espacio que queda entre el revestimiento exterior y la tubería de succión, deberá estar sometido a la misma presión que el sistema hidráulico, si este anillo se encuentra lleno de agua, o el revestimiento protector disponerse de modo que exista un drenaje libre, a la superficie del terreno o hacia un foso adecuado. Este último consiste en una estructura que pueda ser evacuada y que no sea susceptible de inundarse.

Se considera que esta protección es necesaria en las tuberías de succión, para evitar que agua contaminada penetre al sistema hidráulico, si por corrosión o desplazamientos de la tubería, debidos a movimientos de tierra, se pudiera producir un escape en la línea de succión.

La tubería que conduce hasta la bomba de una instalación alejada, podría corresponder a la succión de una bomba de elevación por aspiración, o a la tubería de toma de una bomba de eyector. Bajo ciertas condiciones de funcionamiento, esta última podría hallarse sometida a una presión negativa

Sistemas Enterrados de Descarga

La disposición sanitaria de descarga enterrada, constituye la solución más práctica, para lograr el acabado sanitario de la parte superior de un pozo, cuando se trata de instalaciones retiradas. Este dispositivo, que se ilustra en la Fig. 366, en que el ademe del pozo se extiende por sobre la superficie del terreno, permite conectarse directamente y en forma lateral al tubo mediante conexiones subterráneas impermeables para dotar a la bomba de líneas de succión o de descarga enterradas. Estas tuberías pueden enterrarse por debajo de la línea de congelación, para evitar las consecuencias de ésta.

Antes del advenimiento de este sistema, era una práctica muy generalizada la de instalar las bombas en fosos por debajo de la superficie del terreno, cuando se necesitaba proteger de la congelación a las tuberías. Los fosos de bombas son siempre insalubres, y el sistema que no hace uso de éstos, constituye una manera de eliminarlos.

Además de su aplicación en los sistemas de bombeo retirados del pozo, la descarga enterrada resulta igualmente útil cuando la bomba se instala dentro del pozo con la unidad motriz montada sobre el ademe. En esta forma, la bomba puede ser retirada y vuelta a colocar, sin alterar la tubería subterránea de descarga.

Un dispositivo desmontable y sellado por dentro de la unidad, es el que desvía el agua hacia la tubería de succión o de presión, permanentemente conectada. Este se suspende del extremo superior de la unidad

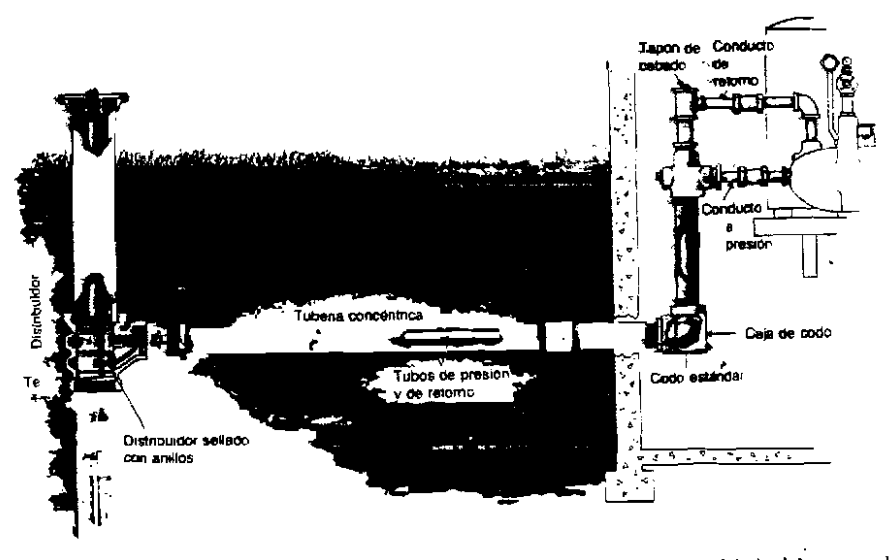


Fig. 366: El adaptador para descarga enterrada brinda un medio de efectuar por debajo del terreno, las conexiones al pozo y a la bomba en tanto que al mismo tiempo, permite que el ademe del pozo sobresalga por encima de la superficie, lográndose así un acabado sanitario adecuado. La tubería concéntrica para instalaciones de bombas de eyector, da proteccion a la tubería horizontal de succión, cuando la bomba se instala retirada del pozo. *(Cortesía de Duplex Mfg. Co.)*

enterrada y puede levantarse verticalmente para extraerlo y dejar abierto en toda su amplitud el pozo, en caso de reparaciones o limpieza.

La instalación mostrada en la Fig. 336 resulta especialmente práctica para ser usada con bombas de eyector, cuando las regulaciones estatales consideran que la toma de la bomba es una línea de succión y exige que ésta sea enfundada por una tubería de mayor diámetro y sometida a presión. En la bomba de eyector, ya sea de uno o dos tubos, la tubería de toma puede colocarse por dentro de la línea a presión de retorno, para cumplir totalmente con las regulaciones.

La mayoría de los ingenieros sanitarios hacen hincapié en la importancia que tiene el empleo de un segundo tubo para recubrir la tubería de succión, cuando el agua o el suelo pudieran ser corrosivos. Cualquier tubería desprotegida y sometida a presión negativa, podría succionar agua producto de la percolación desde la superficie, si la corrosión causara escapes en una junta o un pequeño agujero en el tubo.

Tubo Pesado

Otra manera de proporcionar una protección adicional, es mediante el uso de tubería pesada, especialmente si se están utilizando acoples del tipo rebajado o de manga. Después de hechas las roscas, el espesor de pared de un tubo pesado de 100 mm. de diámetro, es alrededor de 50 por ciento mayor que el correspondiente a una tubería del mismo diámetro y de peso estándar. El acople rebajado provee una manga corta en cada extremo, la que cubre las roscas hasta el punto en que éstas desaparecen. Como en las roscas que se hallan por debajo de estas mangas se forma herrumbre, la acumulación de óxido de hierro retarda la velocidad de corrosión protegiendo de este modo al tubo en los puntos vulnerables. La duración de la tubería aumenta si se la compara con la de peso

estándar, en una proporción casi directa al espesor adicional de metal.

El costo de la tubería pesada de 100 mm. de diámetro, es de alrededor de 2.60 dólares más por metro de tubo, que el de la tubería de peso estándar. Cuando es posible aplicarla, esta solución parece ser la vía más económica para obtener protección adicional contra la corrosión.

Acción Purificadora de la Naturaleza

La acción purificadora ejercida por la naturaleza es de gran importancia económica y ha hecho posible el uso directo de agua subterránea por parte de millones de personas en los Estados Unidos.

El carácter y el grado de este proceso natural de purificación, dependen de diversas características del suelo o del material granular de los acuíferos de arena. Resulta por lo tanto, fundamental estudiar la percolación o penetración del agua a través del suelo o de cualquier otro medio poroso, para comprender cómo actúa la purificación natural.

Toda el agua que percola dentro de la tierra se contamina hasta cierto punto, al iniciar su recorrido por la superficie del terreno. Tanto la lluvia como la nieve que se está derritiendo, adquieren minerales y bacterias de los suelos con los cuales se hallan en contacto.

El grado de contaminación del agua hasta ese momento, depende primordialmente del número y especie de bacterias patógenas que hayan sido depositadas en el suelo como resultado del uso que se le haya dado a éste. El agua que percole a través de una área destinada a lanzar desechos, recoge más bacterias de diversos tipos, que la que se infiltre en el suelo de un campo abierto alejado de poblaciones.

El efluente del drenaje de un tanque séptico que percola en el terreno, se halla, sin lugar a dudas, altamente contaminado. En ocasiones, estos residuos arrastran bacterias patógenas, dependiendo de la salud de las personas cuyos desechos sanitarios se hacen descargar en el tanque séptico.

Debido al intenso uso de sistemas caseros de eliminación de aguas negras, en muchas áreas suburbanas que aún no cuentan con alcantarillado sanitario público, surge hoy día una incógnita trascendental: ¿llegará la percolación de aguas de desechos a contaminar el agua subterránea a un grado tal que la convierta en una amenaza para la salud pública?

El agua contaminada que contiene bacterias patógenas puede potabilizarse en forma segura mediante simple cloración. Casi todas las aguas de ríos y lagos se hallan contaminadas por lo que los abastecimientos para uso humano que se sirven de estas fuentes deben de clorarse.

Los abastecimientos públicos de agua que se surten de pozos se tratan con cloro para obtener un factor adicional de seguridad, aunque las pruebas no indiquen evidencia de que el agua de la fuente esté contaminada. El agua de pozos individuales que abastece a los usuarios de viviendas y pequeños comercios puede también clorarse fácilmente. En la actualidad se dispone de muy buenos instrumentos para aplicar tal tratamiento. De hecho, el grado de purificación que puede aplicarse mediante estos sistemas individuales produce una agua tratada de calidad superior a la mayor parte de los abastecimientos municipales.

Calidad Sanitaria del Agua Subterránea

Muchas poblaciones continúan usando directamente el agua de pozos, sin cloración alguna, cuando los análisis indican consistentemente que el agua subterránea es de excelente calidad sanitaria. De igual manera, la mayor parte de las fincas y viviendas suburbanas que tienen sus propios pozos domiciliarios han usado directamente por años el agua sin tratamiento. Es así como gran número de personas en pueblos y fincas dependen de la capacidad natural de purificación de las formaciones por dentro de

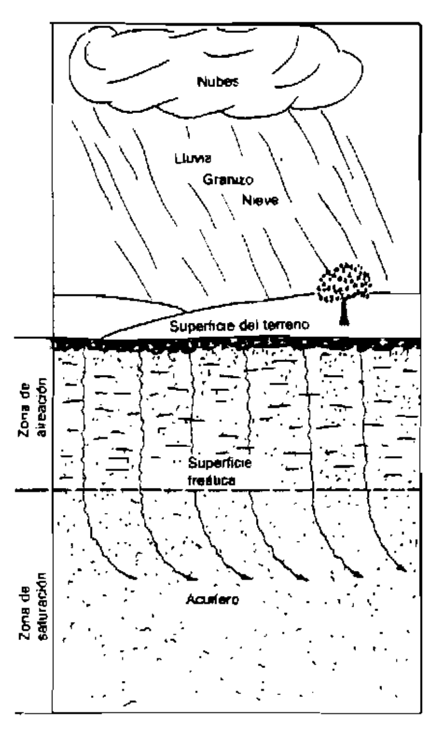


Fig. 367: Cuando el agua ingresa al suelo por la superficie del terreno, se contamina, pero luego es purificada en forma natural conforme va percolando a través de arena y de otros materiales finamente gradados.

las cuales se desplaza el agua, para obtener ésta en condiciones de pureza. Por lo tanto, es muy importante examinar en detalle los factores que inciden en que el agua subterránea se mantenga, por lo general, libre de organismos patógenos, particularmente cuando el agua se manifiesta en acuíferos constituidos por arena.

Para llegar a un conocimiento de estos factores, numerosos investigadores han efectuado pruebas y observaciones del movimiento de las bacterias a través de materiales porosos y granulares. En todos estos experimentos, la bacteria del tipo coliforme ha sido utilizada como índice de la supervivencia o aniquilación de la bacteria patógena. Los ingenieros sanitarios utilizan por lo general las bacterias coliformes, como indicio de la eventual presencia de organismos patógenos, tanto en el abastecimiento de agua, como en el tratamiento de las aguas negras. Los coliformes mismos no son dañinos, pero éstos viven y se reproducen en el tracto intestinal del hombre y de los animales de sangre caliente. Cuando se logra aislar la bacteria coliforme, es de suponerse que la tifoidea, la disentería y otras bacterias del tracto intestinal se hallan también presentes.

Los experimentos demuestran que las bacterias por sí mismas se desplazan muy poco en agua estática que se encuentre saturando a un material poroso. En cierto caso específico, las bacterias de la tifoidea y la disentería se desplazaron solamente alrededor de 2.5 cm. desde el punto en que fueron introducidas a un suelo saturado.[1] Más recientemente se realizó un experimento en el que se pusieron colonias de E. Coli sobre la superficie de una arena saturada esterilizada. El tamaño medio de los granos de arena era de 1.1 mm. Las muestras tomadas durante los siguientes 5 días, indicaron que las bacterias no se habían movido más de unos 6.5 cm. del punto de inoculación.[2]

En otros ensayos se ha demostrado que la bacteria no se desplaza contra la dirección normal del flujo de agua subterránea que tiene lugar dentro de materiales de regular permeabilidad, cuando la velocidad del escurrimiento es de solamente unos 30 a 60 cm. por día.[3,4] Estas observaciones demuestran que las bacterias no nadan alrededor como los peces. El recorrido de la contaminación en arena saturada sólo se produce, por lo tanto, con el movimiento del agua.

La forma en que el agua se mueve, o le es impedido moverse, tanto en suelos como en rocas depende de la magnitud de tres fuerzas que actúan sobre el líquido. La adsorción retiene, por atracción molecular, delgadas películas de agua alrededor de las partículas del suelo. La capilaridad retiene o desplaza

el agua a través de las pequeñas aberturas, como resultado de la tensión superficial. La gravedad impulsa el agua por dentro de los poros más grandes, por diferencias de presión o cuando existe un gradiente hidráulico. El efecto comparativo de estas fuerzas depende, en parte, de la cantidad presente de humedad en relación al espacio vacío del material poroso.

Cuando los vacíos o poros de algún material de la tierra se encuentran completamente llenos de agua, se dice que el material está saturado. El movimiento del agua sólo tendría lugar bajo la acción de la fuerza de gravedad.

Los materiales que se encuentran en libertad de drenar por gravedad, tienen sólo una fracción de sus vacíos rellena de agua. Esto sigue siendo cierto, aun cuando la superficie se halle inundada como es el caso durante la lluvia. En un material que drene libremente, el aire y otros gases llenan el espacio vacío no ocupado por el líquido. Es así como el agua se mueve de diferentes maneras en respuesta a la solicitación tanto de la gravedad como de las fuerzas capilares dependiendo de la relación de agua a aire o al total de vacíos.

Cuando tiene lugar la percolación del agua a través de las formaciones geológicas superiores hasta la zona de saturación (el llamado depósito subterráneo), los líquidos y los gases se hallan dentro de los poros de los materiales. La velocidad de percolación a través de materiales parcialmente saturados de un determinado tipo, varía con el grado de saturación, temperatura, gradiente hidráulico y obstrucción de los vacíos con las partículas infiltradas por el agua. Asimismo, cuando se opera continuamente un sistema de flujo por gravedad, se manifiesta con el tiempo una disminución de la velocidad de percolación.

Remoción de Contaminantes

Aún no se comprenden bien todos los principios en que se basa la percolación del agua dentro del suelo. Sin embargo, sabemos que el proceso de percolación elimina muchos contaminantes y evita que éstos lleguen hasta el depósito de agua subterránea.

Gran número de bacterias son efectivamente eliminadas por la percolación a través de unos pocos centímetros de arena. Varios experimentos, algunos de los cuales se remontan al año de 1900, han demostrado claramente la capacidad del suelo y de los medios porosos para eliminar las bacterias del agua.

Estos experimentos muestran que el proceso de remoción abarca el tamizado mecánico, sedimentación en los finos pasajes que se hallan dentro de los granos, y precipitación química debida a cargas eléctricas o cambios de temperatura.

El tamizado mecánico depende de los tamaños de las partículas y de los poros del material de la formación.

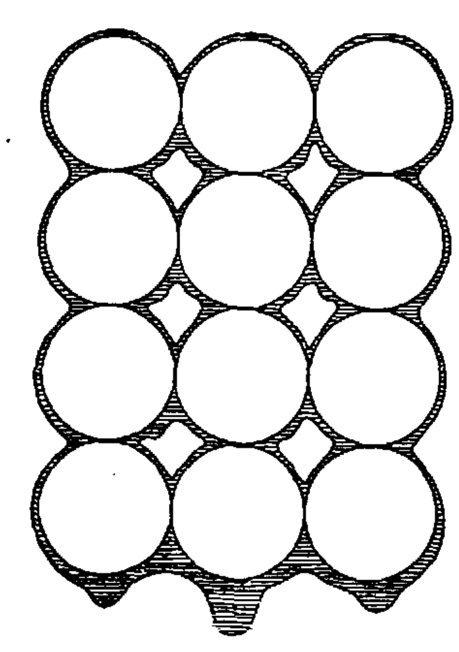


Fig. 368: El agua que ha percolado hasta la zona de aireación, se desplaza en forma de delgadas películas y llena sólo parcialmente los poros. *(Cortesía del U.S. Geological Survey)*

El oxígeno del aire que llena parcialmente los poros tiene un estrecho contacto con las películas de agua conforme éstas se desplazan por la superficie de los granos. Muchos organismos pueden ser aniquilados por oxidación mientras se hallan expuestos en los poros del suelo. La velocidad de percolación determina el tiempo en que la bacteria permanece en contacto con el medio oxidante. Esto, conjuntamente con el período de vida del organismo, puede determinar la distancia que se necesita para una completa remoción conforme progresa la percolación.

Diversas investigaciones del recorrido de las bacterias cerca de letrinas de pozo negro fueron realizadas hace ya más de 30 años. En una de éstas[5], se estableció el avance de la contaminación química y bacterial a través de suelos arenosos. En este caso, la letrina era usada por una familia de 6 personas. Los más permeables de los materiales del subsuelo tenían granos de un tamaño efectivo de 0.101 a 0.127 mm. y coeficientes de uniformidad desde 7.5 a 9.2.

La bacteria coliforme viajó a la misma velocidad del flujo subterráneo durante los primeros 1.50 m. del material permeable. Unas pocas se desplazaron 4.5 m. en 3 días. Después de transcurridos 2 meses, se encontraron coliformes en el 40 por ciento de las muestras tomadas. Un organismo se halló ocasionalmente, a 10.5 m.

En un estrato menos permeable con un tamaño efectivo de 0.076 mm y un coeficiente de uniformidad de 5.2, los bacilos coliformes aparecieron a una distancia de 3 m. después de 35 días y a 4.60 m. se dejaron de observar.

Después de 4 días, se encontró que había contaminación química a 3 m. El desplazamiento químico más remoto se localizó entre los 25 y 30 m.

Después de que a los 3 meses se obtuvo el máximo desplazamiento de la bacteria y de los reactivos químicos, el "frente" de contaminación empezó a retroceder. A los siete meses, la corriente de coliformes había retrocedido prácticamente hasta la letrina. Se cree que la obstrucción de los poros del suelo por los sólidos contenidos en el agua negra y las viscosidades bacteriales son los responsables de esta regresión o retroceso de la extensión de la contaminación.

Mediante posteriores ensayos en el mismo sitio[6], se determinó que los coliformes que se movían conjuntamente con el agua subterránea a la velocidad de 4 m. por día, recorrieron distancias de 12 m. en menos de 3.5 días. La migración bacterial máxima

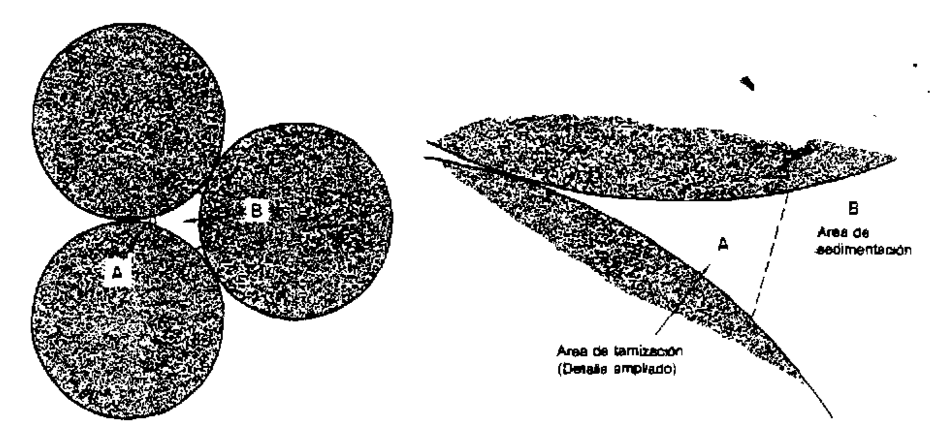


Fig. 369: Diagrama esquemático que muestra las zonas de tamizado próximas a los puntos de contacto de los granos de arena y los poros en donde tiene lugar la sedimentación de los grumos de bacterias cuando la velocidad de desplazamiento del agua es baja. *(Cortesía de la "University of California Berkeley).*

durante la estación lluviosa fue de 24 m. desde la fuente de contaminación.

A su vez, Caldwell probó a reducir el movimiento bacterial poniendo una envoltura de arena fina alrededor del foso de la letrina.[7] Se colocaron 30 cm. de arena cuyo tamaño efectivo era de alrededor de 0.076 mm. y su coeficiente de uniformidad de 3.7 para impedir que el desplazamiento de las bacterias durante 6 meses alcanzara a más de 3 metros desde la letrina. Se encontró luego que no había bacterias coliformes, después de la línea de los 3 m., pero sí contaminación química.

Las muestras tomadas posteriormente a 60 cm. de la letrina, una vez que ésta había sido abandonada, no mostraron la presencia de bacteria coliforme aunque ésta estaba aún presente en la barrera de arena.

Más experimentos posteriores de Caldwell[4], utilizando arenas naturales de mayor uniformidad, con tamaños efectivos entre 0.076 y 0.127, y coeficientes de uniformidad que variaban de 2.7 a 3.7, mostraron que el límite de recorrido de la bacteria coliforme era de unos 3 m. Se comprobó contaminación química a distancias de hasta 93 m. de la letrina. Mientras continuaba el período de inoculación, el frente bacterial comenzó a retroceder.

Reducción de la Concentración Bacterial

Los experimentos hechos en California[8] al esparcir desechos de agua negra sobre el suelo demostraron que la bacteria del tipo coliforme contenida en el agua residual, se había reducido a un nivel aceptado por las normas de agua potable, después de haber las aguas percolado 1.20 m. dentro de una arcilla arenosa fina de clase Hanford, que es una mezcla de arena, limo y algo de arcilla. La percolación de agua negra a través de otros 5 suelos permeables dió por resultado remociones bacteriales del orden de 95 a 100 por ciento, cuando el recorrido alcanzó hasta

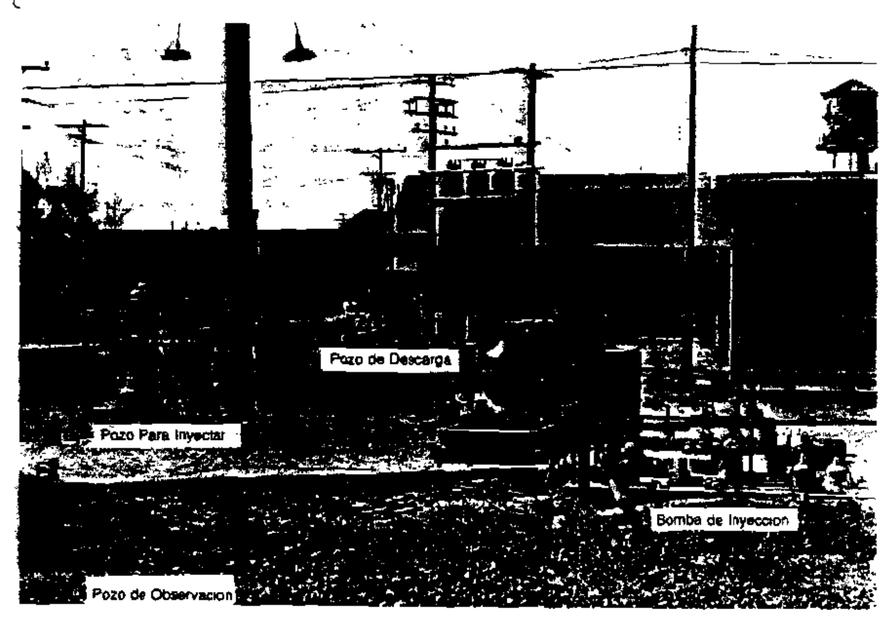


Fig. 370: Laboratorio de campo en la Estación de Richmond Field, Universidad de California, que se utiliza para el estudio del recorrido de la contaminación, al inyectar el efluente de una planta de tratamiento de aguas negras dentro de un acuífero arenoso.

0.90 m. de profundidad. Se ha observado que el grado de remoción se halla relacionado con la permeabilidad del suelo, pero a su vez está grandemente influído por la acumulación de partículas orgánicas del agua negra en el estrato superficial.

Los experimentos llevados a cabo en 1953 en Azusa, California, mediante el derramamiento de aguas negras provenientes de la planta de tratamiento, sobre una parcela de prueba y la determinación del grado de contaminación del suelo a diversas profundidades, demostraron la eficacia de la remoción bacterial[9]. Los resultados obtenidos fueron reportados en la forma siguiente:

"La mitad de todas las muestras tomadas a la profundidad de 2.10 m., siendo las velocidades de percolación mayores de 30 cm. por día, indicaron una remoción del contenido de coliformes, de un 99+ por ciento. *Todas* las muestras obtenidas a la cota de 2.10 m., estando las velocidades de percolación por debajo de 0.30 m. por día, demostraron que la reducción bacterial alcanzó a un 99+ por ciento. Se encontró también que al poner en funcionamiento por primera vez un lecho percolante seco, la concentración bacterial a la misma cota de profundidad, era mucho mayor.

"Pareciera haber quedado claro, que la mayor parte de las bacterias son eliminadas del agua durante el proceso de percolación."

En los experimentos anteriormente relatados, las muestras de solución tomadas de los materiales subsuperficiales, mostraron un contenido mucho menor de bacterias que en el agua negra directamente esparcida en la superficie. Además, las muestras de suelo subsuperficial indicaron un contenido bacterial menor que el de las muestras de la superficie.

En tanto que las formaciones acuíferas arenosas brindan la oportunidad plena de un tamizado mecánico efectivo, las formaciones rocosas fracturadas y fisuradas podrían no ofrecer condiciones, para la remoción bacterial por ese medio. Las fisuras y los canales de disolución pueden ser grandes si se los compara con los poros de la arena o de la grava.

En 1956, algunos pozos completados en un acuífero constituído por caliza próximo a St. Paul, Minnesota, comenzaron a erogar agua con lodo, como consecuencia del acceso de un drenaje superficial a un pozo de 1.80 m. de diámetro que había sido perforado en la cumbre de la caliza, como a unos 800 m. de distancia. En este caso, las aberturas de la caliza casi no produjeron ningún efecto filtrante.

Estudios Europeos sobre el Recorrido Bacterial

En Europa se han realizado investigaciones sobre el efecto autopurificador del desplazamiento del agua a través de suelos arenosos, siguiendo en parte los mismos lineamientos de los estudios más antiguos efectuados en los Estados Unidos.

En los Países Bajos se llevó a cabo un estudio de la penetración de la contaminación en un suelo arenoso de una parcela de acampar con unas 20 hectáreas de superficie. Durante un período de 4 a 5 meses, familias de 4 a 5 personas acampan en este lugar en unas 450 cabañas. Cada cabaña dispone de una letrina de foso. Las 450 letrinas reciben la materia fecal de una población de cerca de 2,000 personas.

El abastecimiento de agua potable de este campo, consiste de tres pozos de alrededor de 36 m. de profundidad. El agua se examina con regularidad, y por años ha continuado siendo de excelente calidad. Ninguna bacteria coliforme ha aparecido nunca en las muestras de agua; el contenido de nitratos es de alrededor de 4 ppm.

El nivel freático se hallaba a la profundidad de 3.0 a 3.7 m. por debajo de la superficie del terreno, en la época en que se hizo el estudio. La precipitación pluvial anual es del orden de 787 mm.

El suelo es muy arenoso. Las muestras

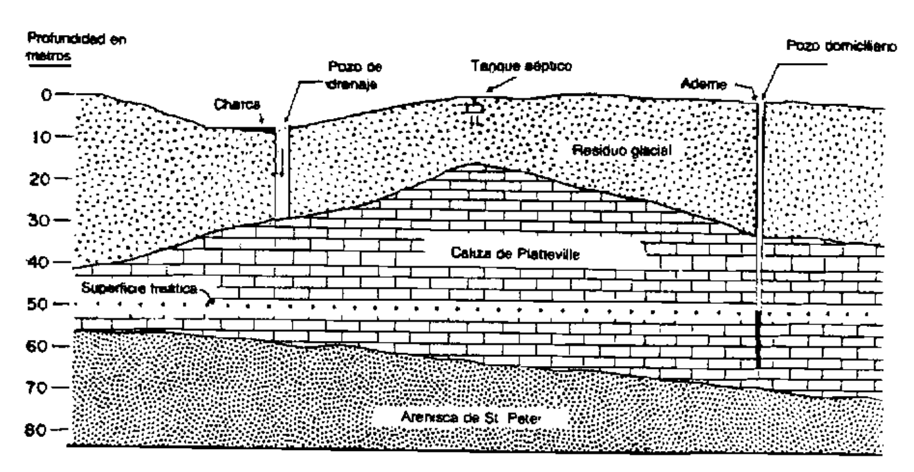


Fig. 371: Este pozo de drenaje, perforado sin considerar su posible efecto sobre la calidad del agua subterránea, constituye un conducto directo para que el agua superficial contaminada penetre al acuífero de roca fisurada.

tomadas en los primeros 2 m. indicaron partículas de un tamaño efectivo de 0.152 mm. y un coeficiente de uniformidad de alrededor de 1.7.

Los recuentos bacteriales en el suelo que rodea a la fosa de la letrina, se hicieron a los 4 meses, y de nuevo a los 7 meses después de concluída la temporada de alojamiento. Las bacterias coliformes fueron muy numerosas en la región adyacente al foso de la letrina, pero no fue posible identificarlas en ningún momento dentro del suelo, a profundidades mayores de 1.50 m. por debajo de la superficie.

Al igual que otros ensayos realizados en los Estados Unidos, esta investigación demostró que la bacteria coliforme penetra en un principio al suelo hasta cierta distancia y luego retrocede a partir de estos puntos de máxima penetración. Esta "defensa del suelo", como se le ha dado en llamar, contrarresta el avance de la contaminación. Ello significa que el desplazamiento de la contaminación bacterial en la arena va perdiendo su importancia conforme pasa el tiempo. Esto mismo, desde luego, no se aplica a las sustancias químicas que se disuelven en el agua.

Los resultados favorables puestos en evidencia por estas investigaciones, se deben a dos factores importantes de la purificación natural del agua que percola, y que son: granulometría media del suelo para lograr una buena filtración y un espesor razonable de la zona de aireación dentro de la cual se verifica la oxidación de la materia orgánica. En el caso descrito, aún el pequeño espesor aireado de 20 cm. situado entre el fondo del foso de la letrina y el nivel estático del agua, era de gran importancia.

En otro sitio de acampar, situado en Holanda, se encontraron condiciones menos favorables.[11] En este caso, el nivel freático se hallaba solamente a 0.90 m. de la superficie y los pozos de abastecimiento eran sólo de 5 a 8 m. de profundidad. Muchas de las muestras de agua tomadas de los pozos revelaron la presencia de bacilos coliformes. Ello demostró una mayor penetración en profundidad de la bacteria, en los casos en que el nivel freático se hallaba prácticamente en contacto con el agua negra de los fosos de las letrinas.

Experiencias con Recarga Artificial

La experiencia europea con la recarga directa[11], en la cual el agua de los ríos es conducida a embalses o canales desde los

cuales se la deja percolar hasta la masa líquida subterránea, ha dado evidencia práctica de cómo el agua se purifica conforme pasa a través de la arena. La recarga directa debe realizarse a través de materiales permeables. Primero se perforan pozos exploratorios para cerciorarse de que no existen estratos impermeables intercalados entre las superficies de desparramiento y nivel freático.

Los pozos recolectores se sitúan a suficiente distancia de los embalses para asegurarse de que el agua que se recoja sea de buena calidad bacteriológica. La distancia de seguridad varía con la calidad del agua cruda y con las características del suelo.

La permeabilidad y el gradiente hidráulico son los que determinan el tiempo que tarda el agua en pasar desde el área en que ésta es esparcida, hasta los pozos. Se ha demostrado que son suficientes un tiempo de recorrido de uno a 3 meses, y una distancia de 90 a 150 m. Debe observarse que el proceso implica el derramamiento y recuperación de volúmenes verdaderamente grandes de agua.

La Arena Purifica el Agua Utilizada en la Recarga

El abastecimiento de agua de las ciudades de Amsterdam, La Haya, Leyden y otras más, se obtiene de pozos emplazados en dunas acuíferas. El agua para la recarga se bombea del Rio Rin, y es conducida por medio de canales hasta las lagunas de infiltración.

El servicio de abastecimiento de agua de Leyden provoca la recarga del área de dunas en la que se hallan emplazados sus pozos, únicamente durante los meses de invierno.

Normalmente, el agua del Rin durante el período de recarga, contiene de 100 a 200 coliformes por centímetro cúbico. Después de haberse desplazado por el acuífero arenoso, la misma agua, al ser bombeada de los pozos, ya no contiene coliformes, demostrando la remoción natural de la contaminación bacterial. Algunas de las bacterias coliformes mueren en las hoyas de infiltración y el resto es eliminado conforme el agua percola a través de la arena.

La formación arenosa subyaciente a las áreas de acumulación de agua tiene un tamaño efectivo de alrededor de 0.15 mm. y un coeficiente de uniformidad del orden de 1.5.

Los pozos más próximos se encuentran situados a 138 m. de las hoyas de recarga y todos captan el agua del acuífero, a una profundidad de alrededor de 9 m. por debajo del fondo de las hoyas. Se supone que el agua de recarga es retenida en la arena por unos 73 días o más, antes de que sea extraída de los pozos por bombeo.

La infiltración en la hoya más antigua del sistema de abastecimiento de Leyden, a menudo alcanza velocidades de 30 a 40 cm. por día. Sin embargo, gran parte del tiempo, éstas disminuyen a 75 cm. por día por causa del aire atrapado en los poros de la arena y por otros tipos de colmatación. La experiencia ha demostrado que las velocidades menores contribuyen a una remoción bacterial más efectiva. Sin embargo, debe hacerse notar que aún con la velocidad más baja, se pueden obtener alrededor de 12.7 m. como lámina de infiltración por estación, cantidad que es unas 50 veces mayor que la recarga normal por precipitación durante un período igual.

Tal como sería de esperarse, las mayores velocidades de recarga artificial arrastran bacilos coliformes por dentro de la arena, hasta profundidades mayores de lo que lo haría la sola percolación de agua de lluvia. Los ensayos realizados en dunas de arena aún no utilizadas demostraron que los 30 cm. de más arriba contenían la mayor cantidad de bacterias. A una profundidad de 50 cm., no se encontraron bacterias coliformes. Sin embargo, por debajo de la hoya más antigua de infiltración, se encontraron esporádicamente bacterias coliformes a profundidad de 3 m.

Cuando se interrumpe la infiltración, el

agua desaparece por debajo de la superficie y el aire es atraído hacia los vacíos de la arena no saturada. Esto suministra oxígeno al lecho, mineralizándose por oxidación las sustancias contaminantes. Además, las burbujas de aire atrapadas reducen la velocidad de infiltración durante la recarga, dando así más tiempo al mecanismo de auto-purificación para realizar su importante función.

Las experiencias prolongadas con pozos de agua emplazados en formaciones arenosas que han venido abasteciendo por años muchos pueblos y ciudades, han demostrado la forma tan digna de confianza en que los procesos naturales purifican el agua que es almacenada en estos acuíferos. Por ejemplo, con excepción de tres de ellas, todas la municipalidades del Estado de Nebraska obtienen el agua de pozos. La mayor parte de estos ha sido completada en acuíferos de arena y grava.

Al referirse a los problemas de la contaminación del agua en Nebraska, el Ingeniero Sanitario del Estado, T. A. Filipi, se expresa así: "En 1957 aparecieron casos de hepatitis infecciosa en una zona a lo largo del río. Estos casos no se extendieron por todo el Estado. Por el contrario, se concentraron en aquellas comunidades que extraen agua del Río Missouri".

El abastecimiento de 431 comunidades de Nebraska, con una población de 570,000 habitantes, se realiza mediante pozos. De esta población 405 pueblos usan el agua directamente sin desinfectarla mediante tratamiento con cloro. Agréguese a esto que más de 450,000 personas del Estado dependen de sus pozos privados para abastecerse de agua. Resulta, pues, muy significativo dentro del marco de la salud pública, una incidencia tan baja de enfermedades de origen hídrico, en una población tan grande que depende del agua obtenida de pozos.

Aunque este ejemplo no podría considerarse como una investigación controlada, constituye una evidencia impresionante de la capacidad de auto-purificación de los materiales granulares el mecanismo primordialmente responsable de la calidad sanitaria del agua subterránea contenida en las formaciones de arena.

Recarga Obtenida al Esparcir Aguas Negras

Los experimentos llevados a cabo en el Laboratorio de Investigaciones de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de California, fueron proyectados para determinar el número de bacilos coliformes que podrían hallarse a diversas distancias por debajo de la superficie del terreno, al esparcir en el suelo el efluente de una planta de tratamiento de aguas negras. En esta forma fueron evaluados varios factores que influyen en el movimiento y remoción de las bacterias.[2,8]

Una de las primeras series de ensayos, demostró que la capa superficial del suelo elimina por filtración todas las partículas finas de los materiales de desecho contenidos en el agua negra. Esto tiene lugar en los suelos altamente permeables, consistentes en su mayor parte de arena, como también suelos en aquellos limosos finamente gradados. A su vez, la acumulación de materia orgánica proveniente del agua negra en contacto con la superficie del suelo, reduce grandemente el número de bacterias que pueden pasar al subsuelo junto con el agua que percola.

Los ensayos que utilizaron un suelo conocido como arena de Oakley, demostraron que la remoción del 95 por ciento de las bacterias se llevó a cabo en los primeros 7.5 cm. del suelo superficial, y casi el 99.99 por ciento, a la profundidad de 1.80 m. En esta experiencia, el agua de desecho fue esparcida durante 46 días.

Los ensayos subsiguientes, que hicieron uso de materiales uniformemente gradados, demostraron que una arena muy fina con un tamaño medio de granos de alrededor de 0.075 mm., permitía eliminar entre el 80 y 90 por ciento de los bacilos coliformes en el estrato mismo de la superficie. Buena parte de la arena más gruesa y de tamaño medio de grano de 1 mm., contribuyó a la remoción de un 10 a un 40 por ciento de los bacilos coliformes en la superficie.

Se hicieron también ensayos para evaluar el efecto que ejerce el gradiente hidráulico en la remoción de la bacteria en los estratos superficiales. Para ello se utilizó arena con granos de un tamaño medio de 0.200 mm. sobre la cual se desparramó agua negra durante 5 días a gradientes hidráulicos que variaron desde 1.5 hasta 7.0. La remoción bacterial en los primeros 7.5 cm. de la arena, demostró no guardar relación con el gradiente hidráulico. Aunque el caudal, influenciado por el gradiente hidráulico, pareciera no afectar a la remoción bacterial en la superficie, la velocidad del agua dentro de los materiales subsuperficiales, sí es altamente significativa.

Recorrido de las Bacterias en Arena Limpia

Dentro del programa investigativo de California[13], se hizo una serie de laboriosos ensayos para medir la velocidad del movimiento de las bacterias dentro de columnas de arena limpia. La forma de moverse las bacterias fue semejante en todos los casos, aún en aquellos en que la arena no se hallaba completamente saturada. El agua que contenía los bacilos coliformes se hizo pasar a través de columnas de arena de 20 cm. de profundidad.

Todos los ensayos mostraron que la primera agua contaminada que llegaba al fondo de la columna de arena, contenía bacterias que habían sido arrastradas junto con el agua más veloz que se había desplazado por el eje de la columna. Cuando el agua se desplaza más despacio por causa de la fricción que se desarrolla en las proximidades de la pared de la columna, las posibilidades de remoción son mayores. Se encontró que la remoción se debe a dos mecanismos: un efecto de tamización en las zonas en donde los granos de arena se hallan en contacto, y un efecto de sedimentación dentro de los poros. El informe concluye diciendo: "En última instancia, todas las bacterias son virtualmente retiradas por el medio mismo o su movimiento llega a retardarse tanto, que prevalecen las fuerzas bactericidas naturales."

Los ensayos con las columnas de arena indicaron que el efecto de tamización aumenta en su capacidad de remoción, conforme las bacterias individuales son atrapadas y se acumulan en las zonas de contacto de los granos de arena. Cuando los grumos de bacterias formados en estos puntos, se vuelven muy grandes, algunos se desprenden y se desplazan hacia zonas más profundas siendo luego eliminados por tamización o sedimentación.

El efecto de sedimentación parece que tiene una gran capacidad de saturación. Su velocidad de remoción es función de la velocidad de flujo y del tamaño y densidad de los grumos de bacterias.

Efecto de los Detergentes en el Recorrido Bacterial

Los experimentos realizados para observar la influencia de los detergentes en el movimiento de los bacilos coliformes, en arena saturada de agua, se llevaron a cabo en el Centro de Ingeniería Sanitaria Taft. Los detergentes químicos se desplazaron a través de una arena limpia del tipo Chillicothe a la mitad de la velocidad de los cloruros. La bacteria coliforme no alcanzó a penetrar más allá de 60 a 120 cm. en 67 días. Aplicaciones de 10 ppm. de detergente ABS, demostraron no afectar el desplazamiento o la concentración de los coliformes.

Además de la remoción mecánica de bacterias en el agua contaminada, mediante tamización y sedimentación en un medio poroso, su desaparición natural y la posibilidad opuesta, esto es, el desarrollo de

bacterias, debe asimismo tenerse en cuenta. Por ejemplo, si las condiciones permiten que la bacteria coliforme se desarrolle y multiplique en el agua que percola, el efecto filtrante del medio poroso pareciera que no contribuye a la purificación del agua.

Las extensas investigaciones realizadas por los bacteriólogos han demostrado que cuando los coliformes y todas las bacterias patógenas de origen hídrico quedan expuestas a condiciones no naturales por un tiempo prolongado, el número de bacterias vivas cambia. Estas perecen o se multiplican. El habitat normal de los bacilos coliformes y de las bacterias patógenas de origen hídrico, es el tracto intestinal del hombre y de los animales. En consecuencia, cuando estos organismos son evacuados conjuntamente con los desechos fecales y descargados al suelo, a los ríos, a las lagunas y al agua subterránea percolante, se hallan a sí mismos en un medio extraño.

Si la temperatura, disponibilidad de nutrientes, humedad, pH y otros factores son desfavorables, el número de sobrevivientes disminuye rápidamente en escala logarítmica, con relación al tiempo de exposición[12]. La cantidad de bacterias puede aumentar cuando éstas quedan expuestas a nuevas condiciones antes de que vuelvan a desparecer. En otros casos, los sobrevivientes de la primera rápida desaparición, pueden llegar a desarrollar cierta resistencia y la tasa de mortalidad del resto, después de esta etapa, podría ser menor.

No obstante, la aniquilación debida a los efectos bactericidas naturales contribuye en forma importante a la autopurificación del agua subterránea durante su desplazamiento y almacenamiento dentro de los acuíferos de arena y de grava.

Seguridad Contra la Precipitación Radiactiva

Las aguas de pozo y las fuentes de agua subterránea de donde se toman éstas, se hallan libres de la contaminación por precipitación radiactiva directa. Los ríos, lagos y embalses superficiales, por otra parte, reciben la precipitación de partículas radiactivas en su superficie y son en consecuencia contaminados por éstas.

Aunque esto pareciera obvio, muchos ignoran la importancia vital de los pozos y de los recursos subterráneos en el suministro de agua de calidad segura, cuando otras fuentes pudieran llegar a ser peligrosamente radiactivas.

La precipitación radiactiva consiste en un polvo radiactivo ampliamente disperso que se precipita desde la nube con forma de hongo que se produce en una explosión atómica. La precipitación y su efecto contaminante tiene lugar, en su mayor parte, en la dirección del viento y a partir del punto de detonación. La precipitación prevalece durante un período de tiempo relativamente prolongado, y las variaciones del viento día a día, hacen que se contaminen áreas que en un principio no fueron afectadas. La precipitación resultante de una explosión de prueba se extendió sobre una área de 18,000 kilómetros cuadrados en el Océano Pacífico.

Las partículas radiactivas caen a la superficie de la tierra por su propio peso, o son arrastradas fuera de la atmósfera por la lluvia. En la eventualidad de un ataque atómico a los Estados Unidos, puede suponerse que la precipitación radiactiva contaminaría todo el país.

La Prevención Resulta más Segura

Los proyectos de defensa civil referentes al abastecimiento de agua, claman por la prevención de la contaminación más que por el tratamiento del agua que ya ha sido contaminada.[15] El agua subterránea calza admirablemente dentro de este concepto, puesto que se encuentra adecuadamente protegida de la contaminación. En regiones en las cuales normalmente se encuentra en uso una considerable cantidad de pozos, se dispondría de un abastecimiento inmediato de emergencia para una población grande.

Sin embargo, hay ciertas sustancias radiactivas que se disuelven en agua y que deben de tenerse en cuenta. El suelo y la arcilla ordinarios son altamente efectivos en la remoción, por intercambio iónico, de la radiactividad.

La percolación del agua a través de las capas superiores de un suelo que contenga algo de arcilla, podría eliminar todo el polvo radiactivo mediante filtración y la mayor parte de la radiactividad disuelta, por intercambio iónico.

Resulta absolutamente necesario tener a mano un abastecimiento de agua por pozos, que se halle protegido de la contaminación. La extracción de agua de una fuente protegida resulta más sencilla y segura que el tratamiento de un suministro contaminado.

Sellado de Pozos Abandonados

Los pozos abandonados necesitan ser sellados cuidadosamente, para evitar la contaminación de la fuente de agua subterránea, eliminar el riesgo físico, conservar el rendimiento del acuífero y la presión artesiana y evitar la posibilidad de que pase agua de mala calidad de un acuífero a otro.

La cementación de los pozos profundos que se vayan a utilizar para eliminar salmuera u otros desechos industriales, es de mayor cuidado que la de la mayoría de los pozos de abastecimiento de agua, ya que cualquier trabajo defectuoso podría causar una seria contaminación del agua subterránea de buena calidad. Es esencial que tales pozos sean completa y uniformemente cementados cuando se construyen, no sólo para evitar la contaminación durante las operaciones de eliminación de desechos, sino también para disminuir los problemas de un sellado adecuado cuando el pozo sea luego abandonado.

El concepto básico de un sellado adecuado de los pozos abandonados, es el de restituir en lo posible las condiciones geológicas reguladoras que existían antes de que el pozo fuera construído o perforado.

Para sellar eficazmente un pozo abandonado, debe darse especial consideración al tipo de manifestacion del agua subterránea en el sitio. Si el agua subterránea se manifiesta en condiciones libres o freáticas, el objectivo que se persigue es el de evitar la percolación de agua superficial a través del agujero o a lo largo del exterior del ademe hasta el nivel freático. Si el agua subterránea se manifiesta en condiciones artesianas, las operaciones de sellado deberán buscar el confinamiento del agua dentro del acuífero en el cual ésta tiene lugar. Esto evitará la pérdida de presión artesiana que resulta de una descarga no regulada del acuífero.

El pozo deberá ser verificado antes de cementarse, para asegurarse de que no existen obstrucciones que pudieran interferir con la labor de sellado. Esto es especialmente importante en aquellos pozos que pudieran provocar el acceso de agua indeseable en acuíferos que rinden agua potable.

Podría ser que se necesitase retirar el ademe de ciertos pozos para lograr colocar un sello efectivo. Los revestimientos o ademes enfrentados a las zonas acuíferas deberán ser retirados o desgarrados con una herramienta especial para garantizar un sellado apropiado de estas zonas. La porción superior del ademe deberá retirarse para asegurar un estrecho contacto de la cementación con la pared del agujero y así constituir un sello impermeable en los 4.50 ó 6.00 m. de más arriba. Caben excepciones cuando el espacio anular en torno al ademe ya había sido cuidadosamente cementado cuando el pozo fue originalmente construído.

El concreto o la pasta de cemento que se utiliza para rellenar el pozo por debajo del nivel del agua, debe colocarse a partir del fondo y hacia arriba, mediante procedimientos que eviten la segregación o dilución del material. Los detalles de estos métodos han sido descritos en el Capítulo 11.

El empleo de los servicios de un competente contratista de pozos es aconsejable cuando se desea realizar un buen trabajo de sellado. Su conocimiento de la construcción de pozos y de las condiciones geológicas de la región contribuirán a que se puedan obtener los resultados apropiados.

Referencias

1. KLIGLER, I. J., "Investigation of Soil. Pollution and Relation of Various Types of Privies to the Spread of Intestinal Infections." Rockefeller Institute for Medical Research Monograph 15 (1921)
2. ORLOB, G. T. and KRONE, R. B., "Movement of Coliform Bacteria Through Porous Media." (1956). Sanitary Engineering Research Laboratory, Univ. of California. Berkeley.
3. STILES, C. W., CROHURST, H. R., THOMSON, G. E., "Experimental Bacterial and Chemical Pollution of Wells Via Ground Water and the Factors Involved." USPHS Hygiene Lab. Bulletin 147 (1927)
4. CALDWELL, E. L., "Pollution Flow from Pit Latrine When Permeable Soils of Considerable Depth Exist Below the Pit." J. Infectious Diseases 62:3, 225-258 (1938).
5. CALDWELL, E. L. and PARR, L. W., Ground Water Pollution and the Bored-Hole Latrine." J. Infectious Diseases, 61:2, 148-183 (1937).
6. CALDWELL, E. L., "Pollution Flow From Pit Latrines When Impervious Stratum Closely Underlies the Flow." J. Infectious Diseases, 61:3, 270-288 (1937).
7. CALDWELL, E. L. "Study of an Envelope Pit Privy," J. Infectious Diseases, 61:3, 264-269 (1937).
8. GREENBERG, A. E. "Field Investigation of Waste Water Reclamation in Relation to Ground Water Pollution." California State Water Pollution Board, Pub. No. 6 (1953). Sacramento.
9. BUSH, A. F., "Studies of Waste Water Reclamation and Utilization." California State Water Pollution Control Board. Publ. No. 9 (1954). Sacramento.
10. BAARS, J. K., "Travel of Pollution and Purification En Route In Sandy Soils." Bulletin of the World Health Organization, Vol. 16 No. 4 (1957). Geneva.
11. KRUL, W. F. J. M., "Sanitary Engineering and Water Economy in Europe." Bulletin of the World Health Organization. Vol. 16 No. 4 (1957). Geneva.
12. PHELPS, E. B., "Stream Sanitation," John Wiley & Sons, New York.
13. GOTAAS, H. B., "Laboratory and Field Investigations of the Travel of Pollution from Direct Water Recharge into Underground Formations," Annual Report (1953). Sanitary Engineering Research Project, University of California, Berkeley
14. GILCREAS, F. W., "Radioactive Pollution of Water Supplies," Water Works Engineering, Vol. 114, No. 3 (1961) New York
15. Federal Civil Defense Division, "Water Contaminated by Radioactive Fallout from Atomic Weapons," Municipal Utilities, Vol. 99, No. 3, (1957). Toronto, Canada.
16. FIEDLER, A. G., "Use of Cement in Well Construction," Water Works Engineering, Vol. 82 (1929) pp. 587, 588, 620-623. New York.

Capitulo 22

Conservación y Aprovechamiento de los Recursos de Agua Subterránea

CUANDO SE ENTABLA una discusión acerca de la conservación de los recursos de agua subterránea, surgen opiniones muy diversas entre las personas que participan. Conservación, cuando se trata de recursos naturales, tiene distintos significados para diferentes personas, cuyas opiniones constituyen a veces claras conclusiones, otras veces ideas vagas y, en ocasiones, puntos de vista opuestos.

El Dr. L. B. Leopold[1] se ha expresado en los siguientes términos de las ideas que se hallan en conflicto en cuanto a la conservación de recursos:

"La idea de conservación ha sido tan bien divulgada y tan bien introducida, que se ha llegado a convertir en un tema muy popular. Cada individuo tiene la suya propia. En América queremos conservar los bosques, el suelo, las aves, los peces, los metales, el petróleo, el agua, el carbón, la vida silvestre y muchas otras cosas más. So pretexto de la conservación, nuestra generación pretende construir represas y al mismo tiempo clama contra éstas; se quiere proteger la vida silvestre y desarrollar sus parajes para recreo de las masas; se clama por la protección de la fauna salvaje y de los rabiosos lobos, coyotes y perros de las praderas. En nombre de la conservación, los americanos están en favor de todo y, al mismo tiempo, en contra de todo; depende de la persona a quien se le haya pedido su opinión".

El Dr. Leopold destaca también el hecho de que nosotros mismos tenemos la tendencia a confundirnos, porque generalmente adoptamos dos diferentes actitudes en cuando al uso de los recursos naturales. Aplicado a los recursos renovables, suelos, agua y bosques, el concepto de conservación puede que implique la utilización del recurso en magnitud y condiciones tales que éste sea restituido tan pronto como se hace uso de él. Esto es a lo que comúnmente nos referimos como explotación a base de conservación.

Al aplicar el término a los recursos no renovables, cobre, hierro, carbón y petróleo, conservación viene a significar el desarrollo racional y una utilización exenta de un desperdicio indebido.

En teoría, el agua subterránea constituye

un recurso renovable, puesto que se origina en el agua que se precipita como lluvia y nieve sobre la superficie de los terrenos. El periodo de reabastecimiento de algunos depósitos subterráneos de agua, como los acuíferos artesianos profundos, debe concebirse *en términos de una, dos y hasta* más generaciones humanas. Con respecto al aprovechamiento corriente que puede hacerse de esta agua, tanto su manifestación como el tiempo que se necesita para renovarla, colocan a una parte del recurso dentro de la clasificación de no renovable.

En ciertas áreas localizadas, se está extrayendo agua de los acuíferos más rápidamente de lo que éstos son reabastecidos por la recarga. Los niveles freáticos en estos lugares están descendiendo gradualmente como resultado de una excesiva extracción del agua que previamente se había acumulado como reserva. En estos casos se ha venido aplicando el término *minado o destrucción del agua subterránea*. Cuándo podría esta práctica resultar racional o no, es algo que depende de nuestros puntos de vista, esto es, del concepto que tengamos de conservación. Las áreas de Estados Unidos en que este agotamiento del recurso se está manifestando en gran escala, se hallan en su gran mayoría en California, sur de Nevada, ciertas partes de Utah, sur de Arizona y Nuevo México, occidente de Texas y Luisiana del sudoeste.

El minado significa que se está aprovechando el agua que previamente se había acumulado en forma de reserva. En otras palabras, la demanda presente se está satisfaciendo a expensas de la reserva.

Extracción Mayor que la Recarga

Los que creen que la conservación del agua subterránea significa su explotación sin producir una sobre extracción, se sorprenden cuando el recurso se va minando. Sin embargo, esto está ocurriendo en ciertas áreas tal como sucede en otros lugares con el cobre, porque económicamente resulta conveniente hacerlo. La sobre-explotación continuada en determinado lugar consumirá la reserva almacenada de agua subterránea o hará que los niveles desciendan, con el consiguiente aumento en los costos de bombeo, hasta un punto en que la extracción se torne antieconómica.

Cuando esto suceda en el área de las Altiplanicies de Texas, por ejemplo, la economía de la región retrocederá de un régimen basado en el riego intensivo de fincas, a la del cultivo en secano de las regiones semiáridas.

Los que sostienen que la conservación representa el uso racional sin desperdicio indebido piensan que es conveniente utilizar el agua para lograr beneficios económicos mientras dure. Se reconoce que esta situación podría prolongarse por sólo 40, 50 ó 60 años. Los que así opinan suponen que la condición es la misma que la de un yacimiento mineral cuya explotación quedaría paralizada al agotarse el recurso.

Los individuos que mantienen la idea de la explotación a base de conservación se desaniman al implantarse cualquier política de utilización del agua, que tienda al agotamiento de las reservas subterráneas de una área cualquiera. No obstante, estas mismas personas no consideran como criterio equivocado el utilizar un yacimiento mineral para lograr beneficios económicos hasta el día en que se llegue a excavar en el terreno la última tonelada de material.

La Situación de Arizona

El clima árido a semiárido de Arizona y de otras regiones semejantes guarda una relación muy directa con la necesidad de riego de cultivos y en particular con el uso de agua subterránea para el mismo propósito. Un informe sobre la situación de Arizona dice así:

"El factor que más se distingue en el constante desarrollo de Arizona es el de la disponibilidad de abastecimientos adecuados de agua. Más de las dos terceras partes del abastecimiento proviene de los depósitos de agua subterránea. Así pues, ésta última es importante para la economía de Arizona, particularmente para su agricultura . . .

"Las reservas de agua subterránea son vastas, pero no inagotables . . . Resulta de importancia vital, el manejo adecuado de éstas . . . Sólo se dispone para el reabastecimiento de los acuíferos de un uno por ciento del volumen anual de precipitación pluvial; por consiguiente, resulta imposible que en la mayor parte de las áreas, la recarga natural compense a la extracción . . .

"Casi todos los aspectos relativos al clima de Arizona parecieran indicar una contínua y creciente necesidad de utilización del agua subterránea, en todas las fases del desarrollo cultural y económico del estado.".

Rendimiento Seguro de los Acuíferos Freáticos

Los acuíferos freáticos que son reabastecidos mediante infiltración directa de la precipitación y por percolación producida por corrientes de agua dulce pueden ser abatidos sin detrimento, hasta el límite en que lo permita la recarga inducida. Tales acuíferos no son por lo general de mucho espesor ni gran estensión superficial. Muchos de los más importantes se encuentran en rellenos aluviales de los valles formados por ríos perennes e intermitentes. Otros de ellos ostentan el carácter de depósitos glaciales someros, en los cuales la arcilla u otros estratos impermeables, que yacen por encima de la superficie freática, oponen obstáculos localizados a la recarga directa de la lluvia o del deshielo. Los acuíferos freáticos mostrados en las Figs. 13, 14, y 18, constituyen ejemplos de lo anterior.

Sería conveniente imponer tres condiciones a la extracción de agua de estos acuíferos, para limitar el bombeo a un volumen igual al de la recarga promedio, sea ésta natural o artificial.

En primer lugar, el almacenamiento total de agua subterránea no es tan cuantioso como en los acuíferos artesianos de mayor extensión; segundo, la recarga directa que podría contribuir a obtener un rendimiento perenne tiene lugar sobre la mayor parte de la extensión superficial del acuífero; tercero, el bombeo en condiciones freáticas reduce necesariamente el espesor saturado del acuífero en la proximidad de cada pozo y precisamente en una magnitud equivalente al abatimiento. Si el nivel dinámico desciende mucho, ello da como resultado una eficiencia muy baja, tal como se describió en el Cap. 6. Por consiguiente, el desarrollo óptimo del recurso exige balancear la extracción anual con la recarga habida durante el mismo período.

Procediendo de este modo, posiblemente se manifiesten considerables fluctuaciones del nivel freático. Un bombeo continuado durante dos o tres años, en los cuales la precipitación fuese menor que la normal, reduciría las reservas que normalmente se almacenan, ocasionando una declinación de los niveles. Estos últimos volverían a subir durante las épocas de recarga excesiva, en que el volumen de agua agregado al acuífero, superaría al del bombeo realizado durante esos mismos años húmedos.

Infiltración Inducida por Ríos

Cuando el material del acuífero consiste de aluvión adyacente a alguna corriente perenne, se puede fácilmente inducir recarga del río hacia el acuífero, mediante el bombeo de éste último. En estas condiciones, tanto el depósito de agua subterránea como el cauce de la corriente vienen a formar parte de una misma unidad hidrológica. El diagrama de la izquierda, en la Fig. 13, es característico de una condición tal. Además de la infiltración inducida que tiene lugar cuando se bombean pozos cercanos, la corriente recarga al acuífero en forma sustancial durante los períodos de crecida. Los caudales de avenida erosionan el fondo del cauce, mejorando así

la conexión hidráulica que existe entre el río y el acuífero.

Recarga Inducida en Dayton, Ohio

La ciudad de Dayton, en Ohio, como también algunas grandes instalaciones industriales del área de Dayton, obtienen voluminosas cantidades de agua de pozos construídos en los rellenos de los valles. Existen cauces en el basamento rocoso pre-glacial, rellenos parcialmente de arenas glaciales cuyo espesor alcanza a 45 y 60 m. El Río Miami y sus afluentes discurren sobre este relleno permeable. Conforme se bombea agua a expensas de la reserva del acuífero, el espacio de almacenamiento es reabastecido por la infiltración proveniente de lagunas, cauces de ríos y precipitación pluvial que penetra al terreno dentro de la zona de influencia de los pozos. El volumen medio diario de bombeo en el año de 1958, fue de más de 416.350 m³, y probablemente hoy día sea mayor. Esta extracción total de agua subterránea se halla balanceada por las recargas natural e inducida.[4]

Acuíferos Costeros

Cuando un acuífero se halla expuesto por debajo del nivel del mar a lo largo de la línea de costa de una masa terrestre, la parte superior de la formación acuífera contiene agua dulce, en tanto que la inferior se encuentra saturada de agua salada. Se podría considerar que la masa de agua dulce subterránea flota sobre el agua salada contenida en el acuífero.[5]

Como ambas aguas tienen diferente densidad y por hallarse el nivel freático del agua dulce por encima del nivel del mar, la zona de contacto entre las dos masas líquidas se mantiene en un equilibrio hidráulico. A grosso modo, el agua dulce se extiende hasta una profundidad equivalente a unas 40 veces la altura a que el nivel del agua dulce se halla por encima del nivel medio del mar. Esta relación se conoce como el principio de Ghyben-Herzberg.

Ya que la existencia de agua dulce a cualquier profundidad apreciable exige que su nivel piezométrico se encuentre siempre a una elevación superior a la del nivel medio del mar, se deduce de ello, que necesariamente debe existir una gradiente hidráulica de agua dulce en dirección al mar. El agua dulce descarga al océano bajo influencia de esta gradiente hidráulica. La parte del acuífero que queda expuesta por debajo del nivel del mar constituye un frente natural de evacuación de agua dulce. Para que la zona de contacto entre las aguas salada y dulce se mantenga en posición a cierta profundidad por debajo de la superficie del terreno, es imprescindible la presencia de una gradiente hidráulica y de un desplazamiento del agua dulce, ambos hacia el mar. La posición y la fluctuación de esta zona de contacto dependen del balance hidrodinámico entre ambas masas líquidas y no simplemente del equilibrio estático que implica el principio de Ghyben-Herzberg. En la Fig. 372, se muestra en forma esquemática la conformación de la zona de contacto.

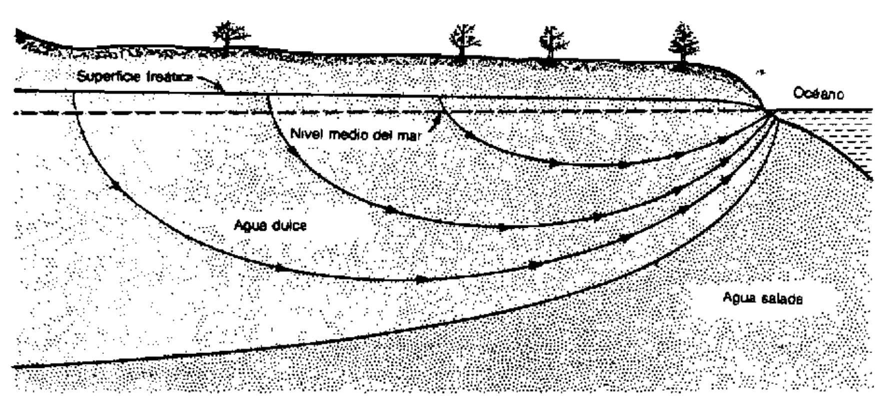


Fig. 372: Esta sección vertical muestra los elementos del equilibrio hidrodinámico entre las aguas salada y dulce de un acuífero costero, en el cual el nivel freático se mantiene constante por efecto de la recarga de agua dulce. Al bombear de pozos, el balance podría alterarse y provocar que el agua salada se desplazase tierra adentro.

Si al bombear pozos se extrae agua de un acuífero costero, el equilibrio hidrodinámico se altera, disminuyendo la descarga natural de agua dulce hacia el mar y produciéndose el descenso del nivel freático. Como resultado de esto, el agua salada invade tierra adentro por cierta distancia, condición que se ha dado en llamar intrusión de agua salada.

Si solamente se intercepta por bombeo de pozos una parte del flujo natural de agua subterránea y si, además, los pozos se hallan emplazados a una distancia razonable tierra adentro de la costa, el agua salada del acuífero puede mantenerse suficientemente desplazada hacia el mar, por efecto del flujo restante de agua dulce, lográndose de este modo que los pozos eroguen agua libre de sal en todo momento.[6]

El escurrimiento total subterráneo dentro del acuífero es igual al caudal de la recarga natural de agua dulce que tiene lugar sobre el terreno. Parte de este escurrimiento puede extraerse por medio de bombeo de pozos, pero no así cierta porción a la cual debe permitírsele seguir fluyendo continuamente hacia el mar, para lograr mantener la interfase salina a segura distancia del sitio de emplazamiento de los pozos.

Potencial Acuífero

La discusión anterior, a la vez que ciertos otros detalles de las manifestaciones del agua subterránea y de la hidráulica de los pozos presentados en los capítulos iniciales de este libro, plantean una interrogante fundamental acerca del abastecimiento de agua subterránea: Cuán prolongada podría ser la extracción que se hiciese por bombeo de una formación acuífera a un caudal determinado?

La respuesta a esta pregunta depende del volumen de la reserva de agua subterránea, el cual es invariable y de la magnitud de la recarga, que sí es una cantidad variable. Asimismo, depende también del aspecto económico de la situación. Podría decidirse bombear a cualquier caudal hasta que toda el agua aprovechable se hubiese agotado, o a una razón tal que garantice un abastecimiento ininterrumpido durante un cierto período de tiempo.[7]

Antes de que el hombre intervenga en la realización de cualquier desarrollo de agua subterránea, el desplazamiento de ésta y la reserva de la misma, dentro de un acuífero, se encuentran en equilibrio hidrológico, o lo que es lo mismo, la efluencia y afluencia medias de agua son de igual magnitud. Los pozos hechos por el hombre sustraen agua de alguna parte del sistema natural. Al utilizarse los pozos, el eflujo total podría llegar a superar el eflujo, o podría también mantenerse el equilibrio, apartando de su curso normal, únicamente una cantidad tal de agua que no llegue a exceder del aflujo. En este caso, el término aflujo tiene el significado de recarga media.

El Concepto de Desarrollo Optimo

Resulta una sana práctica considerar el desarrollo óptimo del agua subterránea de tres maneras, relacionando específicamente cada una con el tipo de sistema hidrológico y forma de manifestarse el recurso. La regulación del uso para lograr un óptimo desarrollo, es congruente con el logro de sanas metas de conservación de recursos y de la obtención de beneficios económicos. Los sistemas hidrológicos y la proporción correspondiente de abastecimiento total que

puede obtenerse de éstos por medio de pozos, caen dentro de las siguientes clasificaciones generales:

1. En los acuíferos fácilmente recargables desde la superficie, la extracción media puede llegar a ser igual al reabastecimiento, pero nunca excederlo.

2. En los acuíferos artesianos profundos que experimentan poca o ninguna recarga dentro de las áreas en donde se pretende utilizar el agua, la extracción promedio podría superar a la recarga, pero esto deberá tratarse con cuidado mediante evaluaciones cuantitativas de la cantidad de reserva de agua que se esté utilizando.

3. En los acuíferos costeros o en las islas oceánicas, la extracción media debe ser considerablemente menor que la recarga promedio, con el objeto de mantener la línea de contacto entre aguas salada y dulce, a una prudente distancia en dirección al mar, de los pozos en explotación.

Estos principios puede que sean muy generales y demasiado simples como para aplicarlos a ciertos casos decididamente complejos. No obstante, constituyen puntos de vista prácticos al planear el uso del agua subterránea y al reflexionar sobre la influencia potencial que ejerce del desarrollo, en una serie de factores afines al campo de la administración de recursos hidráulicos.

Recarga Artificial

En ocasiones, el agua que se extrae por bombeo de un pozo puede reponerse artificialmente. El reabastecimiento artificial se ha venido practicando por décadas y se halla en aumento. En esta forma se puede detener la declinación de los niveles del agua subterránea, suplementar las reservas existentes, eliminar los sólidos en suspensión mediante la filtración a través del suelo e impedir que la intrusión de agua salada dé al traste con los pozos de agua dulce en las áreas costeras.

Las operaciones de reabastecimiento deben llevarse a cabo de manera que aumenten la reserva del depósito de agua subterránea, pero en tales condiciones que no desmejoren la calidad de ésta hasta el extremo de volverla inadecuada al uso que se pretende darle.

En la región de Long Island, el agua que se extrae por bombeo de los pozos, para propósitos de enfriamiento y acondicionamiento de aire, debe de manejarse dentro de un sistema de recirculación para hacerla retornar a los acuíferos de agua dulce mediante su inyección a través de pozos de recarga. El agua producto de la escorrentía de aguaceros, en el Condado de Nassau de Long Island, se recoge en fosos de recarga desde donde se la deja percolar de nuevo al terreno.[3]

Fosos de Recarga en Peoria, Illinois

El manejo de fosos experimentales de recarga por parte del Illinois Water Survey en cooperación con el municipio y con la Asociación de Comercio de Peoria, por más de 10 años, en Peoria, Ill., ha demostrado que el agua contaminada de río puede utilizarse como fuente de reabastecimiento o recarga sin que ello afecte la calidad sanitaria del agua subterránea.[9]

El primer foso de Peoria fue puesto en operación a finales de 1950. Este tiene $578 m^2$ de área y se encuentra localizado en la ribera occidental del Río Illinois. El foso ha sido excavado hasta una profundidad de 3 m. por debajo del nivel regulado de embalse del río. Mediante una estructura de toma y ciertos controles apropiados, se admite la entrada de agua al foso durante aquellos meses en que la turbiedad se reduce relativamente. Toda el agua de recarga es desinfectada con cloro. El flujo que se produce se conduce por gravedad.

Las grandes cantidades de limo presentes en el río, que deben ser filtradas por los materiales granulares colocados en el fondo y los lados del foso, causan una considerable

fluctuación de la velocidad de recarga. Este es un problema que se presenta en casi todo proyecto de recarga artificial.

En 1956 se construyó en Peoria un segundo foso experimental. El propósito principal de éste foso más reciente es el de obtener información sobre la distancia que se necesita dejar entre fosos adyacentes para que se produzcan en forma completa los aflujos. Los taludes laterales de este segundo foso son de pendiente menos pronunciada que en el primero, porque la experiencia ha demostrado que la mayor parte de la recarga tiene lugar a través del fondo.

Haciendo funcionar conjuntamente ambos fosos, se ha logrado hacer llegar al depósito de agua subterránea en una sola estación del año, la cantidad de $3.800.000 m^3$ de agua.

La compañía Bemis Bros, Bag. Co. construyó un foso de recarga en otro lugar de Peoria, cuyo diseño se hizo siguiendo los descubrimientos realizados por el Illinois Water Survey. Esta instalación dió comienzo a sus operaciones en enero de 1956 y se caracteriza por una alta tasa de aflujo. También la Peoria Water Works Company ha desarrollado una área de recarga que ha sido diseñada más como una instalación de terreno inundable. Esta última tiene una tasa de aflujo por unidad de área, que es algo menor que la de los fosos de recarga especialmente construídos.

Recarga en Long Island

Desde 1936 se hallan en funcionamiento en Long Island, New York, algunas hoyas de recarga para hacer llegar al subsuelo el agua producto de la lluvia. Estas instalaciones han permitido reabastecer los acuíferos que subyacen a Long Island, con millones de metros cúbicos de agua, en lugar de lanzar la escorrentía al océano.[8]

Estas hoyas se construyen por lo general en parejas; una parte consiste de una laguna de almacenamiento en la cual se sedimenta el limo antes de que el agua fluya a la hoya de recarga propiamente dicha. El alquitrán que pudiese haber sido arrastrado por el agua desde calles recientemente alquitranadas o asfaltadas, puede retirarse de la superficie del agua en la hoya de detención.

En algunas áreas de Long Island en donde no es posible construir hoyas de reabastecimiento, se utilizan pozos difusores de agua. Mediante el empleo de pozos de inyección se conserva el agua subterránea haciendo retornar el agua que se extrae para enfriamiento o acondicionamiento de aire.

Una de las mayores hoyas de recarga se halla localizada en Garden City. Esta mide

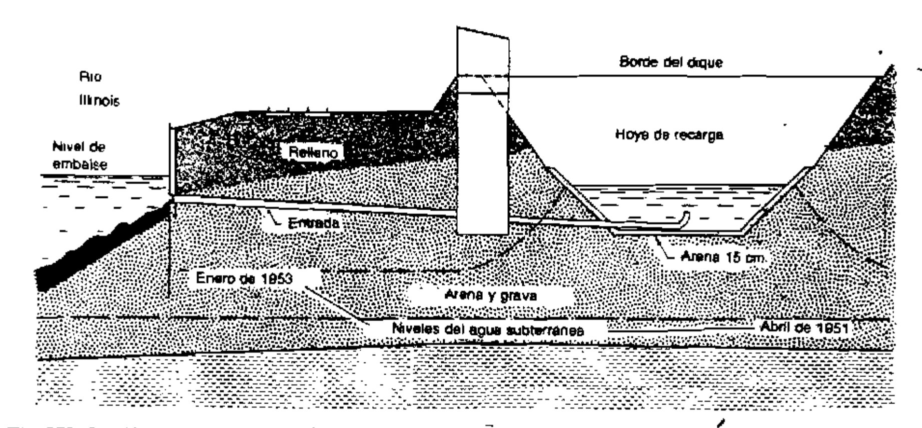


Fig. 373: Sección transversal vertical del primer foso experimental de recarga manejado por el Illinois Water Survey de Peoria, Ill. El lecho del cauce del Río Illinois es casi impermeable debido a su grueso depósito de limo y materia orgánica.

198 m. de largo, 122 m. de ancho y 3.3 m. de profundidad y drena una área de 842 hectáreas. La capacidad de la hoya es de 70,800 m³ y el área del fondo, de 20,900 m². Algunas hoyas menores tienen una capacidad de 1.700 m³.

Factores del Diseño de las Hoyas

W. Fred Welsch, anterior funcionario del Departamento de Obras Públicas del Condado de Nassau, ha desarrollado criterios de diseño mediante observaciones y ensayos de instalaciones de recarga. Las pruebas realizadas en una hoya experimental han revelado capacidades de percolación que varían entre 1.6 y 16 m³ por m² y por día. Las pruebas fueron llevadas a cabo bajo una gran diversidad de condiciones durante todas las épocas del año. Estas demostraron que la capacidad de percolación de la hoya experimental siempre excede la de los prototipos. El mismo resultado se obtuvo aunque no se escarificara la superficie de la hoya experimental y aunque ésta se mantuviese llena con más frecuencia que la hoya principal.

Los cálculos estimativos de la tasa de percolación en los prototipos de hoyas indicaron que el caudal de recarga era del orden de 0.936 m³/m²/día. Las profundidades del agua durante estas observaciones flucturaron entre 0.15 y 2.75 m. Adoptando para el diseño un factor de seguridad de 2 se utilizó una tasa de 0.47 m³/m²/día, con la cual se lograría obtener una recarga de aproximadamente 4.700 m³ por hectárea y por día. Se encontró también que para obtener resultados óptimos, el fondo de las hoyas de recarga debe estar situado a unos 2.10 a 3.00 m por encima del nivel estático del agua del acuífero.

Para mantener la percolación a su más alta tasa posible, el fondo de las hoyas debe escarificarse con rastrillo unas dos veces al año. La penetración en la superficie es de unos 5 cm. El rastrillado se hace cuando el fondo de las hoyas se halla seco y el crecimiento de hierbas es aún pequeño. Con esto se logra aniquilar la hierba, mantener limpio el fondo y dejar expuesta una superficie porosa. La hoya almacenadora a la entrada recibe la mayor parte del limo, de modo que sólo una pequeña cantidad de éste se acumula en la hoya de percolación. Sin embargo, si esta delgada capa de limo no se hace desprender, sellaría la superficie, reduciéndose así la capacidad de recarga.

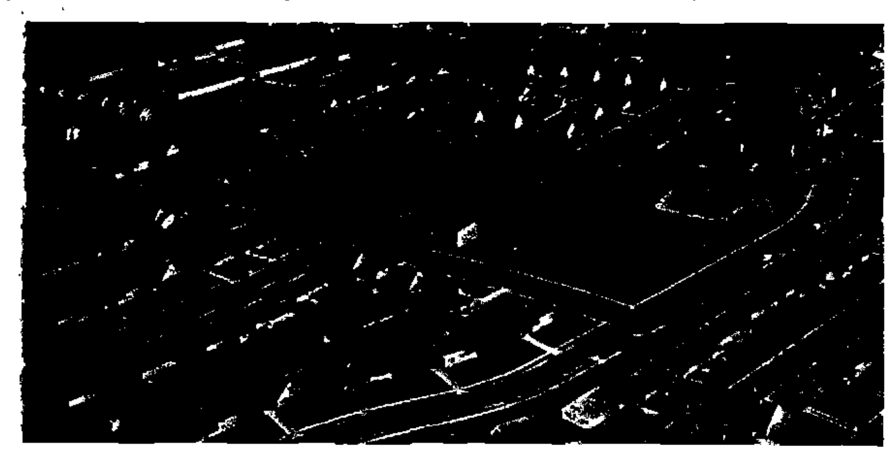


Fig. 374: Instalación característica de recarga en Westport Long Island, New York. La fosa de la izquierda constituye el embalse de detención desde donde el agua rebosa a la fosa de percolación propiamente dicha, mostrada a la derecha.



Fig. 375: Bombeo de agua subterránea para el riego de cebada en una región semiárida de Idaho.

Los experimentos del Condado de Nassau han demostrado que cuando solamente se mata la hierba, la superficie no se abre lo suficiente. Algunas de las hoyas fueron tratadas de esta última manera durante varios años, al cabo de los cuales hubo necesidad de eliminar la mezcla superior de limo y grava y reponerla con arena y grava limpias.

La extracción media diaria de agua subterránea en Long Island, durante el año 1936, fue de 1.430,730 m³. En el mismo año, se hizo retornar al terreno, mediante pozos de inyección, pozos difusores de agua de lluvia y hoyas de recarga, la cantidad de 272,554 m³.

Derrame de Agua en Regiones Áridas

En los estados áridos occidentales, el exceso de caudal de los ríos durante la estación lluviosa es apartado en hoyas, fosos, zanjas y pozos de inyección, recuperándolo de este modo para su utilización en la época seca. En algunas áreas la recarga se obtiene por medio de aguas residuales industriales y efluentes de agua negra.

En California se ha empleado en forma muy intensa y por muchos años, el procedimiento de desparramar el agua en el terreno para reabastecer el depósito de agua subterránea. Este estado recarga más el subsuelo que todos los demás estados juntos. Los terrenos para desparramar el agua son del tipo de hoyas y de lecho fluvial modificado. Se ha puesto gran atención a la reducción del contenido de limo de los caudales de avenida, para que las tasas de infiltración resulten altas y el agua percole rápidamente durante el corto tiempo en que se dispone de escorrentía provocada por lluvia.[10]

Los primeros sistemas en California, se diseñaron primordialmente para desparramar el agua sobre áreas superficiales más grandes en lugar de utilizar los lechos naturales de los ríos y dar de este modo oportunidad a que entre más agua al suelo para que luego percole hasta la superficie freática. El desparramar con este propósito los caudales máximos de avenida sin control alguno, provoca dificultades y ofrece peligros. La recarga artificial se lleva a cabo a menudo conjuntamente con embalses superficiales en los cuales una parte del flujo de avenida es retenido temporalmente. En esta forma, cantidades reguladas de agua son luego tomadas de los embalses y desparramadas en el terreno, fosos, o pozos, para recargar así el depósito de agua subterránea. Durante los períodos de estiaje, debe procurarse agotar los depósitos de agua subterránea, proveyendo de este modo espacio para almacenar el agua disponible en los períodos húmedos.

Recarga Artificial en Holanda

Muchas ciudades grandes del norte de Holanda, han obtenido agua subterránea por más de 50 años, de pozos situados en extensas áreas de dunas de 3 a 5 km. de ancho, a lo largo de la costa del Mar del Norte. La elevación de la superficie de las dunas varía entre 4.5 y 21 m sobre el nivel del mar. El depósito de agua subterránea (zona de saturación) contenido dentro de las

dunas, recibe una recarga directa por infiltración de la lluvia.

Conforme la demanda de agua aumentaba antes de 1940, la recarga natural de las dunas acuíferas no era lo suficientemente grande como para compensar la creciente extracción de agua subterránea. Por consiguiente, se dió comienzo a la recarga artificial utilizando para ello el agua del Río Rin. En 1940 la ciudad de Leyden inició el uso de su sistema de recarga, bombeando agua de río hasta una serie de hoyas de infiltración, a razón de alrededor de 1.000 m^3/año. En 1954 el sistema fue ampliado para obtener un promedio de 3.000 m^3 por año. La Fig. 377 muestra una sección transversal vertical de una parte del sistema de infiltración del abastecimiento de agua de Leyden. La situación representada en la figura, se refiere a las condiciones prevalecientes en el período de recarga, el cual deliberadamente está restringido a los meses de invierno. Por lo general, las hoyas se hacen funcionar en forma intermitente. Esto permite que cada hoya se seque y se limpie después de transcurrir un cierto período de operación. Además de evitar que la superficie se selle, el procedimiento aumenta las tasas de infiltración.

La eficacia de la acción purificadora natural que se produce conforme el agua percola a través de la arena de las dunas, en dirección a los pozos recolectores, fue descrita en las páginas 475, 476 y 477 del Capítulo 21.

Las ciudades de Amsterdam y La Haya y los abastecimientos provinciales de agua en el norte de Holanda recurren también a la recarga, aún en forma más intensiva, de otras áreas de dunas de las cuales obtienen su agua subterránea. La disposición de los sistemas de recarga no sólo satisface las necesidades de las municipalidades, sino que también sirve para evitar la intrusión salina desde el Mar del Norte, al mantener suficiente presión hidrostática sobre toda la masa de agua dulce subterránea, tanto por dentro como por debajo de las dunas.

Almacenamiento de Agua Dulce en Acuíferos Salobres

Un importante experimento sobre recarga, que se llevó a cabo en 1946 en Camp Peary, en Virginia[11], demostró que es posible almacenar agua dulce dentro de una arena acuífera que se halle saturada previamente de agua de calidad indeseable. Para el experimento de recarga, se utilizó un pozo

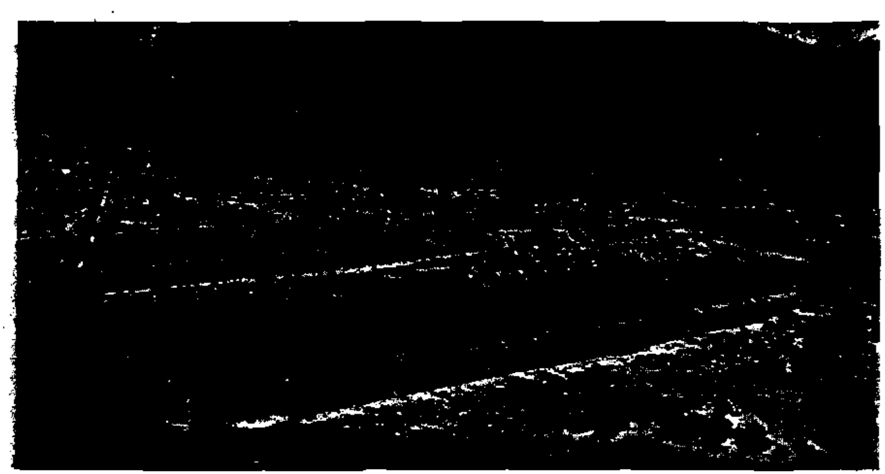


Fig. 376: Estos diques en serie, constituyen hoyas de desparramamiento para la recarga del agua subterránea en Cucamonga Creek cerca de Upland, en California. *(Cortesía del U.S. Department of Agriculture)*

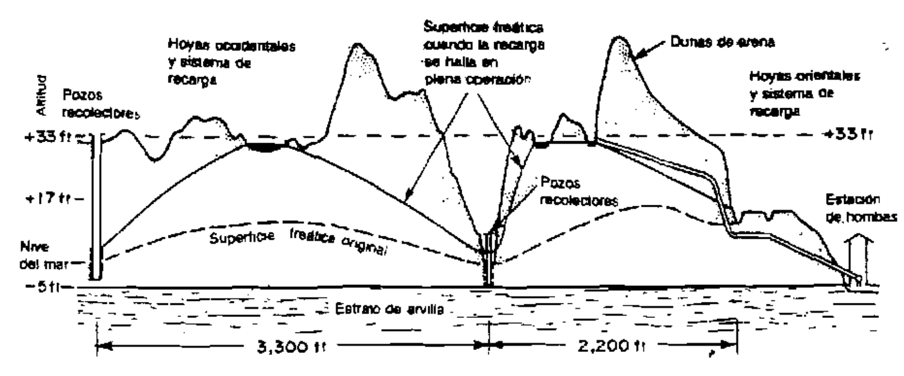


Fig. 377: Ubicación relativa de las hoyas de infiltración y de los pozos recolectores del sistema de abastecimiento de agua de Leyden, Holanda. La costa se encuentra a la izquierda, hallándose a la derecha el terreno de las dunas.

de producción de 20 cm. de diámetro y 114 m. de profundidad, completado dentro de un acuífero arenoso y acondicionado con una rejilla cuya abertura de ranura era del No. 40. Este pozo produjo 1.160 litros por minuto a un abatimiento de 20 m. El contenido medio de cloruros del agua subterránea del acuífero era de 340 ppm. El nivel estático del agua se mantenía a 21.4 m. por debajo de la superficie del terreno el día en que se dio comienzo al experimento.

Utilizando el pozo, se inyectó al acuífero agua dulce con un contenido de alrededor de 12 ppm de cloruros, desde el 4 de abril hasta el 28 de junio. La descarga introducida al pozo varió desde 660 hasta 265 litros por minuto y hubo de interrumpirse varias veces cuando la obstrucción causaba disminución de la tasa de recarga. Esta última era recuperada haciendo que el pozo arrojara el agua durante cortos períodos. En total, se introdujeron al acuífero unos 64,345 m. cúbicos de agua.

Enseguida del período de recarga, se bombeó el pozo desde el 2 de julio hasta el 21 de setiembre, excepto durante un período de reposo de 10 días. La descarga promedio de bombeo fue de uno 946 litros por minuto. Al principio, el agua bombeada contenía alrededor de 12 ppm. de cloruros, o sea, el mismo contenido del agua de recarga. Después de haber bombeado 31,794 m^3, el contenido de cloruros alcanzó a 20 ppm. Cuando se habían bombeado 47,691 m^3 de agua, o sea alrededor del 75 por ciento del volumen inyectado, el contenido de cloruros llegó a ser de 98 ppm. Una vez que el bombeo alcanzó un volúmen de 64,345 m^3, o sea, el mismo volumen inyectado, la concentración de cloruros subió hasta 220 ppm. Esto representaba una mezcla de alrededor del 60 por ciento de agua subterránea normal y 40 por ciento de agua dulce de recarga. Posteriormente, el contenido de cloruros aumentó hasta alcanzar su valor característico de 340 ppm conforme se continuó bombeando.

El experimento demostró que se puede inyectar agua dulce dentro de una formación acuífera salobre y recuperarla luego habiendo ésta perdido sólo una pequeña proporción de la buena calidad de agua que se agregó al almacenamiento del acuífero.

Operación de los Pozos de Recarga

Las experiencias con pozos de recarga van desde un éxito completo hasta un rotundo fracaso. El agua clorada libre de sólidos en suspensión se puede utilizar por lo general sin gran dificultad. En algunos casos, sin embargo, el agua tibia que se hace retornar al terreno, proveniente de sistemas de acondicionamiento de aire, provoca el desarrollo de organismos productores de

viscosidades que obstruyen el pozo de recarga. El limo presente en el agua obstruye la rejilla del pozo y la formación a tal grado que es arrastrado conjuntamente con el agua inyectada que sale del pozo. El aire disuelto u otros gases contenidos en el agua, han llegado a producir efectos obstructores semejantes, por una forma de taponamiento que se produce en los poros del acuífero.

Es imprescindible el tomar provisiones definidas para limpiar periódicamente los pozos de recarga cuando se necesita restaurar la capacidad de éstos. Los materiales causantes de obstrucciones, deben extraerse por bombeo de vez en cuando. Deberá dejarse instalada una bomba en el pozo, o planearse la instalación de modo que ésta pueda introducirse fácilmente de vez en cuando al necesitarse efectuar la operación de limpieza.

Algunos pozos de recarga, llamados pozos difusores, son completados dentro de materiales porosos no saturados por encima de la superficie freática. Este tipo de diseño tiene la desventaja de que es muy difícil de limpiar cuando oeurre una obstrucción.

Administración de Campos de Pozos

La administración de los desarrollos de agua subterránea, empieza lógicamente con la etapa exploratoria antes de que se construyan las instalaciones de abastecimiento de agua[13]. Los estudios geológicos e hidrogeólogicos, incluyendo las perforaciones de prueba y los ensayos de bombeo, son normalmente parte de la labor de exploración. Deben recopilarse cuidadosamente todos los registros de cada pozo de prueba, incluyendo los detalles de construcción, descripción de los materiales atravesados y la calidad del agua. Deberá de prepararse un mapa minucioso de la localización de los pozos y adoptarse un sencillo sistema de identificación que pueda servir por años.

Uno de los aspectos más importantes de la información que debe compilarse es el de un registro de las fluctuaciones de los niveles del agua. Estos constituyen una memoria permanente de las condiciones en que se hallaba el agua subterránea antes de que se construyeran nuevas instalaciones.

Una vez que los pozos de producción se encuentran en funcionamiento, deberá proseguirse con un programa regular de observaciones. Los niveles de agua deberán medirse periódicamente en todos los pozos, ya sea que éstos se encuentren en funcionamiento o en reposo. Se deben de tomar muestras de agua para su análisis químico, mantenerse registros detallados del comportamiento de los pozos y una tabulación cronológica del régimen de bombeo. Estos registros son de gran valor para el manejo de los pozos y para analizar el efecto que ejerce a largo plazo la extracción sobre el comportamiento del acuífero. Los problemas que pueden surgir como consecuencia de una extracción excesiva, contaminación, intrusión de agua salada, agotamiento de los niveles del agua y cambios excepcionales de temperatura pueden afrontarse en forma positiva cuando se dispone de información concerniente a la historia del campo de pozos.

Preservación de la Calidad del Agua

La contaminación es uno de los problemas de la conservación del agua. La carestía de agua puede surgir cuando el abastecimiento disponible no es de calidad requerida y cuando el tratamiento para mejorarla resulta muy costoso. Aunque se pueden dar muchos ejemplos de casos innecesarios de contaminación que no deberían haber ocurrido, lo cierto es que la contaminación es en cierta medida inevitable dentro del uso normal que hacemos del agua.

Es imperativo que se haga todo lo que sea posible para disminuir la contaminación, pero siempre existirá ésta en el agua natural, no obstante las medidas que se adopten.

Harvey O. Banks, Director del Water Resources de California, ha enfocado este punto de vista en la siguiente discusión sobre usos prioritarios del agua[14]:

"Así como nuestras necesidades de agua han aumentado, también lo han hecho las fuentes y especies de desechos humanos . . .

"Debemos aceptar que hay que darle un destino a los inevitables desechos que resultan de la actividad humana, agrícola, domiciliaria, urbana e industrial; no puede evitarse que la mayor parte de estos desechos sea arrojada a la superficie y a las aguas subterráneas. De la misma manera, debemos reconocer que no disponemos de métodos viables económicos para depurar los desechos o darles un destino tal que no implique el deterioro de la calidad de los recursos del agua a donde sus productos finales van a parar . . .

"Hemos llegado a un punto en donde cualquier utilización del agua que no produzca una retribución económica y social se considera un desperdicio. Para obtener una óptima retribución, debemos de ser parsimoniosos con la calidad del agua, disfrutándola como un avaro gasta su dinero, de modo que una cierta cantidad de ésta sea reutilizada en la medida en que su calidad va decayendo . .

"El destino de los desechos no constituye necesariamente un inconveniente en nuestras circunstancias. Es una faceta necesaria de nuestra cultura y del medio económico. Si definimos la contaminación en el amplio sentido de cualquier clase de deterioro de la calidad, resulta imposible evitarla totalmente. La cuestión no radica en evitar en forma absoluta el deterioro, sino en cómo podríamos ubicarnos dentro del panorama total económico y social . . .

"Caeríamos en un grave error dentro de nuestra filosofía de la contaminación, si al considerar ésta la restringiéramos solamente a los desechos municipales y a los producidos por las instalaciones industriales. Una carga muy cuantiosa de contaminación proviene de los caudales de retorno de riego. El retorno de riego contiene cantidades muy significativas de pesticidas, reactivos químicos agrícolas y otras cosas de esta índole. Cuando tenemos muchos miles de hectáreas de tierra sometidos a riego con un flujo de retorno de unos 1,500 m^3 por hectárea y por año, resulta imposible depurar tal tipo de desecho antes de permitírsele volver al río, debido a su enorme volumen y a la imposibilidad de siquiera intentar recolectarlo. Parte de éste regresará al agua subterránea desplazándose luego lateralmente para descargar en los ríos en forma de percolación efluente."

Obviamente, el agua que se necesita para consumo humano debe ser excluída de una parte de la discusión anterior. La protección de las fuentes de agua potable contra la contaminación, o la descontaminación eficaz o desinfección de tal abastecimiento, es un hecho conspicuo. Dentro de la inconmensurable prioridad que tiene el agua necesaria para la vida, las ventajas que caracterizan al agua subterránea son de especial importancia.

En resumidas cuentas, cuanto más valiosa se torne el agua, más conflictos surgen de su utilización y administración. De este modo, vemos que estamos enfrentados al hecho universal de que el agua es el común denominador de todas las actividades humanas, o dicho con las palabras con que empezamos este libro: "El hombre es esclavo del agua".

Referencias

1. LEOPOLD, Luna B., "Water and the Conservation Movement," Circular 402, (1958). U.S. Geological Survey, Washington.
2. THOMAS, Harold E., "The Conservation of Ground Water," (1957). The Conservation Foundation, McGraw Hill Book Co., New York.
3. WHITE, Natalie D., and others, "Annual Report on Ground Water in Arizona, 1964-1965, Water Resources Report 24, Arizona State Land Department, Phoenix
4. NORRIS, Stanley E., and SPIEKER, Andrew M., "Ground Water Resources of the Dayton Area, Ohio," Water Supply Paper 1808, (1966). U.S. Geological Survey, Washington.
5. BEAR, Jacob and TODD, D. K., "Transition Zone Between Fresh and Salt Waters in Coastal Aquifers," (1960). Hydraulic Laboratory, University of California, Berkeley.
6. TODD, D. K. "Ground Water Hydrology." (1960), John Wiley & Sons, New York.
7. HARSHBARGER, J. W., and others, "Arizona Water," Water Supply Paper 1648, (1966), U. S. Geological Survey. Washington.
8. BRASHEARS, M. L., Jr., "Artificial Recharge of Ground Water on Long Island," Economic Geology, Vol. 41 (1946), pp 503-516, Economic Geology Publishing Co., Lancaster, Pennsylvania.
9. "Artificial Ground-Water Recharge at Peoria," Bulletin 48, (1960), Illinois State Water Survey, Urbana.
10. MUCKEL, Dean C., "Replenishment of

Ground-Water Supplies by Artificial Means," Technical Bulletin 1195, (1959), U.S. Department of Agriculture, Washington
11. CEDERSTROM, D. J., "Artificial Recharge of a Brackish Water Well," December, 1947, The Commonwealth, Virginia Chamber of Commerce, Richmond.
12. "Water: Yearbook of Agriculture, 1955," U.S. Department of Agriculture, Washington.
13. GERAGHTY, James, "Water Newsletter," Vol. 4, No. 9, (1962). Water Information Center, Inc., Port Washington, New York
14. BANKS, Harvey O., "Priorities for Water Use," (1960), Proceedings National Conference on Water Pollution, pp 153-156, 179, 181; U.S. Public Health Service, Washington.

APENDICE . . .

Referencia del Texto: Capítulo 1, página 6. Información obtenida de la Circular 456, del U.S. Geological Survey.

Tabla I

Resumen por Estados, Año de 1960, de la Extracción de Agua, Exceptuando la que se Emplea en Energía

(Millones de metros cúbicos por día)

	Extracción de Agua						
	Excluyendo pérdidadas por conducción en riego						
	Agua Subterránea			Agua Superficial			Todas las Fuentes
Población en miles	Dulce	Salada	Dulce y Salada	Dulce	Salada	Dulce y Salada	Incluye perdidas de Conducción
3,267	0.83	0	0.83	15.14	0.53	15.52	16.65
226	0.09	0	0.09	0.64	0	0.64	0.76
1,302	12.11	0	12.11	6.81	0	6.81	23.09
1,786	3.79	0	3.79	2.01	0	2.01	6.06
15,717	41.64	0.53	41.64	41.64	34.44	75.7	132.48
1,754	7.19	0.04	7.19	28.77	0.04	29.14	41.64
2,535	0.30	0	0.30	3.79	3.79	7.57	7.95
446	0.19	0	0.19	0.22	3.10	3.33	3.52
4,952	6.06	0	6.06	8.33	12.49	21.20	26.87
3,943	1.63	0	1.63	6.81	1.63	8.71	10.22
634	2.20	0.08	2.27	2.27	0.98	3.26	6.06
667	9.46	0	9.46	32.93	0	32.93	60.56
10,081	2.27	0.15	2.42	49.21	0	49.21	52.99
4,662	1.51	0.04	1.55	20.44	0	20.44	21.95
2,758	1.25	0	1.25	6.43	0	6.43	7.95
2,179	4.54	0	4.54	6.06	0	6.06	11.73
3,038	0.42	0	0.42	9.08	0	9.08	9.46
3,257	3.10	0.15	3.26	20.44	6.43	26.87	31.04
969	0.12	0	0.12	1.59	0.45	2.04	2.16
3,101	0.42	0	0.42	3.52	4.92	8.33	9.08[2]

Población en miles	Extracción de Agua — Excluyendo pérdidadas por conducción en riego — Agua Subterránea: Dulce	Salada	Dulce y Salada	Agua Superficial: Dulce	Salada	Dulce y Salada	Todas las Fuentes: Incluye perdidas de Conducción
5.149	0.72	0	0.72	3.79	6.81	10.60	11.36
7.823	1.51	0.05	1.59	24.22	0	24.22	25.74
3.414	1.25	0	1.25	7.95	0	7.95	9.08
2.178	2.35	0	2.35	1.51	0.61	2.12	4.54
4.320	0.72	0.01	0.76	6.81	0	6.81	7.57
675	0.42	0	0.42	20.44	0	20.44	26.87
1.411	5.68	0	5.68	6.06	0	6.06	16.65
285	1.36	0.01	1.36	5.68	0	5.68	8.71
607	0.12	0	0.12	0.72	0.95	1.67	1.78
6.067	2.01	0.03	2.04	7.95	7.95	15.90	18.17
951	3.79	0	3.79	3.67	0	3.67	9.84
16.782	2.35	0.06	2.42	27.25	21.57	49.21	52.99
4.556	0.64	0	0.64	9.46	0.12	9.46	10.22
632	0.14	0.02	0.16	0.49	0	0.49	0.76
9.706	2.38	0	2.38	41.64	0	41.64	45.42
2.328	1.10	0.17	1.29	1.82	0.49	2.35	3.67
1.769	2.16	0	2.16	21.95	0	21.95	30.28
11.319	1.97	0	1.97	45.42	1.74	45.42	49.21
2.353	0.79	0.01	0.79	1.21	2.46	3.67	4.54
859	0.10	0	0.10	0.38	1.14	1.51	1.63
2,383	0.53	0	0.53	3.14	0.45	3.63	4.16
681	0.45	0.01	0.45	0.61	0	0.61	1.40
3,567	2.31	0	2.31	18.93	0	18.93	21.57
9,580	34.44	0.04	34.44	16.28	5.30	21.20	64.35
891	1.55	0.01	1.59	12.87	0.02	12.87	17.03
390	0.11	0	0.11	0.31	0	0.31	0.42
3,967	0.68	0	0.68	15.14	3.41	18.17	18.93
32	0	0	0	0	0	0	0.01
2.853	2.99	0	2.99	16.65	0.18	17.03	23.85
1,860	0.49	0	0.49	17.41	0	17.41	17.79
3,952	2.01	0	2.01	13.63	0	13.63	15.52
330	0.42	0	0.42	12.49	0	12.49	17.41
764	0	0	0	1.59	0	1.59	1.59
178,463	60.56	1.36	174.11	643.45	117.34	757.00	1,021.95

1) Excluyendo Alaska, Hawaii, Puerto Rico e Islas Vírgenes.
2) Incluye 0.26 MMC, de efluente de aguas negras.

Los usos del agua pueden clasificarse como sustractivos y no sustractivos, consuntivos y no consuntivos. Cuando se trata de una sustracción, ello implica que el agua sea retirada del terreno o derivada de un cauce o de un lago. Aquí caben los usos para riego, domiciliarios, para ganadería, para servicios municipales y para propósitos industriales. La generación de energía hidroeléctrica se considera también un uso sustractivo. La cantidad de agua extraída de un lugar, representa todo el volumen de agua que se toma con fines de utilización. Esto podría denominarse bombeo, captación, derecho de agua o necesidades de agua.

El uso no sustractivo no necesita derivación. La navegación, la recreación, el destino que se les da a los desechos y la conservación de los peces y vida silvestre, son ejemplos de usos no sustractivos.

El usario del agua adquiere el liquido de un sistema público de abastecimiento o lo extrae directamente de la fuente, para su propio uso. Esto último se denomina autoabastecimiento.

El uso consuntivo es aquella parte del agua que se escapa hacia la atmósfera por el proceso de evaporación, o la que se llega a incorporar a ciertos productos a través de procesos tales como el desarrollo vegetativo, preparación de alimentos y preparados industriales. El uso consuntivo representa solamente una pequeña proporción de la extracción total.

El agua que se indica como salada, en la Tabla 1, es la que contiene más de 1,000 ppm. de sólidos disueltos, no importa su composición.

La mayor parte del agua que se consume, se utiliza en riego, un factor de importancia adicional, si se considera que en su mayoría los riegos se efectúan en épocas y lugares en donde el abastecimiento de agua tiende a ser muy limitado. En los meses secos y cálidos, cuando el clima es árido y la tasa de evaporación alta, se consume un mayor porcentaje del agua extraída.

Referencia del Texto: Capítulo 6, página

Desarrollo de la ecuación para determinar la transmisividad mediante los datos de abatimiento residual.

Del siguiente razonamiento se puede deducir la relación que existe entre el abatimiento residual y la relación del tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo a un tiempo cualquiera después de haber cesado la extracción, t/t'.

El abatimiento que se produce a cualquier distancia r, del pozo de bombeo, durante el período de extracción, está dado por la siguiente manera de expresar la fórmula modificada de no equilibrio.

$$s = \frac{264\,Q}{T} \log \frac{0.3\,Tt}{r^2 S}$$

La recuperación del nivel, como resultado de la inyección de agua mediante un pozo imaginario de recarga, viene dada por la misma fórmula si simplemente se sustituye t' por t. El abatimiento residual es la diferencia entre el descenso causado por el pozo de bombeo y la recuperación que se produce como consecuencia de la inyección de agua al acuífero a través del pozo de recarga. Expresada matemáticamente, esta diferencia queda establecida por la siguiente expresión:

$$s' = \frac{264\,Q}{T}\left[\log \frac{0.3\,Tt}{r^2 S} - \log \frac{0.3\,Tt'}{r^2 S}\right]$$

Simplificando y cancelando esta ecuación, tendremos como resultado la siguiente expresión:

$$s' = \frac{264\,Q}{T} \log t/t'$$

Puesto que en una prueba determinada, Q y T son magnitudes constantes, el abatimiento residual, s', viene a ser directamente proporcional al log t/t'. Al llevar a un gráfico los valores del abatimiento residual contra los valores del

Tabla XIV Valores de $W(u)$ Correspondientes a Valores de u para ser Utilizados en la Fórmula de No Equilibrio de Theis

N \ u	$N \times 10^{-15}$	$N \times 10^{-14}$	$N \times 10^{-13}$	$N \times 10^{-12}$	$N \times 10^{-11}$	$N \times 10^{-10}$	$N \times 10^{-9}$	$N \times 10^{-8}$	$N \times 10^{-7}$
1.0	33.9616	31.6590	29.3564	27.0538	24.7512	22.4486	20.1460	17.8435	15.5409
1.1	33.8662	31.5637	29.2611	26.9585	24.6559	22.3533	20.0507	17.7482	15.4456
1.2	33.7792	31.4767	29.1741	26.8715	24.5689	22.2663	19.9637	17.6611	15.3586
1.3	33.6992	31.3966	29.0940	26.7914	24.4889	22.1863	19.8837	17.5811	15.2785
1.4	33.6251	31.3225	29.0199	26.7173	24.4147	22.1122	19.8096	17.5070	15.2044
1.5	33.5561	31.2535	28.9509	26.6483	24.3458	22.0432	19.7406	17.4380	15.1354
1.6	33.4916	31.1890	28.8864	26.5838	24.2812	21.9786	19.6760	17.3735	15.0709
1.7	33.4309	31.1283	28.8258	26.5232	24.2206	21.9180	19.6154	17.3128	15.0103
1.8	33.3738	31.0712	28.7686	26.4660	24.1634	21.8608	19.5583	17.2557	14.9531
1.9	33.3197	31.0171	28.7145	26.4119	24.1094	21.8068	19.5042	17.2016	14.8990
2.0	33.2684	30.9658	28.6632	26.3607	24.0581	21.7555	19.4529	17.1503	14.8477
2.1	33.2196	30.9170	28.6145	26.3119	24.0093	21.7067	19.4041	17.1015	14.7989
2.2	33.1731	30.8705	28.5679	26.2653	23.9628	21.6602	19.3576	17.0550	14.7524
2.3	33.1286	30.8261	28.5235	26.2209	23.9183	21.6157	19.3131	17.0106	14.7080
2.4	33.0861	30.7835	28.4809	26.1783	23.8758	21.5732	19.2706	16.9680	14.6654
2.5	33.0453	30.7427	28.4401	26.1375	23.8349	21.5323	19.2298	16.9272	14.6246
2.6	33.0060	30.7035	28.4009	26.0983	23.7957	21.4931	19.1905	16.8880	14.5854
2.7	32.9683	30.6657	28.3631	26.0606	23.7580	21.4554	19.1528	16.8502	14.5476
2.8	32.9319	30.6294	28.3268	26.0242	23.7216	21.4190	19.1164	16.8138	14.5113
2.9	32.8968	30.5943	28.2917	25.9891	23.6865	21.3839	19.0813	16.7788	14.4762
3.0	32.8629	30.5604	28.2578	25.9552	23.6526	21.3500	19.0474	16.7449	14.4423
3.1	32.8302	30.5276	28.2250	25.9224	23.6198	21.3172	19.0146	16.7121	14.4095
3.2	32.7984	30.4958	28.1932	25.8907	23.5881	21.2855	18.9829	16.6803	14.3777
3.3	32.7676	30.4651	28.1625	25.8599	23.5573	21.2547	18.9521	16.6495	14.3470
3.4	32.7378	30.4352	28.1326	25.8300	23.5274	21.2249	18.9223	16.6197	14.3171
3.5	32.7088	30.4062	28.1036	25.8010	23.4985	21.1959	18.8933	16.5907	14.2881
3.6	32.6806	30.3780	28.0755	25.7729	23.4703	21.1677	18.8651	16.5625	14.2599
3.7	32.6532	30.3506	28.0481	25.7455	23.4429	21.1403	18.8377	16.5351	14.2325
3.8	32.6266	30.3240	28.0214	25.7188	23.4162	21.1136	18.8110	16.5085	14.2059
3.9	32.6006	30.2980	27.9954	25.6928	23.3902	21.0877	18.7851	16.4825	14.1799
4.0	32.5753	30.2727	27.9701	25.6675	23.3649	21.0623	18.7598	16.4572	14.1546
4.1	32.5506	30.2480	27.9454	25.6428	23.3402	21.0376	18.7351	16.4325	14.1299
4.2	32.5265	30.2239	27.9213	25.6187	23.3161	21.0136	18.7110	16.4084	14.1058
4.3	32.5029	30.2004	27.8978	25.5952	23.2926	20.9900	18.6874	16.3848	14.0823
4.4	32.4800	30.1774	27.8748	25.5722	23.2696	20.9670	18.6644	16.3619	14.0593
4.5	32.4575	30.1549	27.8523	25.5497	23.2471	20.9446	18.6420	16.3394	14.0368
4.6	32.4355	30.1329	27.8303	25.5277	23.2252	20.9226	18.6200	16.3174	14.0148
4.7	32.4140	30.1114	27.8088	25.5062	23.2037	20.9011	18.5985	16.2959	13.9933
4.8	32.3929	30.0904	27.7878	25.4852	23.1826	20.8800	18.5774	16.2748	13.9723
4.9	32.3723	30.0697	27.7672	25.4646	23.1620	20.8594	18.5568	16.2542	13.9516
5.0	32.3521	30.0495	27.7470	25.4444	23.1418	20.8392	18.5366	16.2340	13.9314
5.1	32.3323	30.0297	27.7271	25.4246	23.1220	20.8194	18.5168	16.2142	13.9116
5.2	32.3129	30.0103	27.7077	25.4051	23.1026	20.8000	18.4974	16.1948	13.8922
5.3	32.2939	29.9913	27.6887	25.3861	23.0835	20.7809	18.4783	16.1758	13.8732
5.4	32.2752	29.9726	27.6700	25.3674	23.0648	20.7622	18.4596	16.1571	13.8545
5.5	32.2568	29.9542	27.6516	25.3491	23.0465	20.7439	18.4413	16.1387	13.8361
5.6	32.2388	29.9362	27.6336	25.3310	23.0285	20.7259	18.4233	16.1207	13.8181
5.7	32.2211	29.9185	27.6159	25.3133	23.0108	20.7082	18.4056	16.1030	13.8004
5.8	32.2037	29.9011	27.5985	25.2959	22.9934	20.6908	18.3882	16.0856	13.7830
5.9	32.1866	29.8840	27.5814	25.2789	22.9763	20.6737	18.3711	16.0685	13.7659
6.0	32.1698	29.8673	27.5646	25.2620	22.9595	20.6569	18.3543	16.0517	13.7491
6.1	32.1533	29.8507	27.5481	25.2455	22.9429	20.6403	18.3378	16.0352	13.7326
6.2	32.1370	29.8344	27.5318	25.2293	22.9267	20.6241	18.3215	16.0189	13.7163
6.3	32.1210	29.8184	27.5158	25.2133	22.9107	20.6081	18.3055	16.0029	13.7003
6.4	32.1053	29.8027	27.5001	25.1975	22.8949	20.5923	18.2898	15.9872	13.6846
6.5	32.0898	29.7872	27.4846	25.1820	22.8794	20.5768	18.2742	15.9717	13.6691
6.6	32.0745	29.7719	27.4693	25.1667	22.8641	20.5616	18.2590	15.9564	13.6538
6.7	32.0595	29.7569	27.4543	25.1517	22.8491	20.5465	18.2439	15.9414	13.6388
6.8	32.0446	29.7421	27.4395	25.1369	22.8343	20.5317	18.2291	15.9265	13.6240
6.9	32.0300	29.7275	27.4249	25.1223	22.8197	20.5171	18.2145	15.9119	13.6094
7.0	32.0156	29.7131	27.4105	25.1079	22.8053	20.5027	18.2001	15.8976	13.5950
7.1	32.0015	29.6989	27.3963	25.0937	22.7911	20.4885	18.1860	15.8834	13.5808
7.2	31.9875	29.6849	27.3823	25.0797	22.7771	20.4746	18.1720	15.8694	13.5668
7.3	31.9737	29.6711	27.3685	25.0659	22.7633	20.4608	18.1582	15.8556	13.5530
7.4	31.9601	29.6575	27.3549	25.0523	22.7497	20.4472	18.1446	15.8420	13.5394
7.5	31.9467	29.6441	27.3415	25.0389	22.7363	20.4337	18.1311	15.8286	13.5260
7.6	31.9334	29.6308	27.3282	25.0257	22.7231	20.4205	18.1179	15.8153	13.5127
7.7	31.9203	29.6178	27.3152	25.0126	22.7100	20.4074	18.1048	15.8022	13.4997
7.8	31.9074	29.6048	27.3023	24.9997	22.6971	20.3945	18.0919	15.7893	13.4868
7.9	31.8947	29.5921	27.2895	24.9869	22.6844	20.3818	18.0792	15.7766	13.4740
8.0	31.8821	29.5795	27.2769	24.9744	22.6718	20.3692	18.0666	15.7640	13.4614
8.1	31.8697	29.5671	27.2645	24.9619	22.6594	20.3568	18.0542	15.7516	13.4490
8.2	31.8574	29.5548	27.2523	24.9497	22.6471	20.3445	18.0419	15.7393	13.4367
8.3	31.8453	29.5427	27.2401	24.9376	22.6350	20.3324	18.0298	15.7272	13.4246
8.4	31.8333	29.5307	27.2282	24.9256	22.6230	20.3204	18.0178	15.7152	13.4126
8.5	31.8215	29.5189	27.2163	24.9137	22.6112	20.3086	18.0060	15.7034	13.4008
8.6	31.8098	29.5072	27.2046	24.9020	22.5995	20.2969	17.9943	15.6917	13.3891
8.7	31.7982	29.4957	27.1931	24.8905	22.5879	20.2853	17.9827	15.6801	13.3776
8.8	31.7868	29.4842	27.1816	24.8790	22.5765	20.2739	17.9713	15.6687	13.3661
8.9	31.7755	29.4729	27.1703	24.8678	22.5652	20.2626	17.9600	15.6574	13.3548
9.0	31.7643	29.4618	27.1592	24.8566	22.5540	20.2514	17.9488	15.6462	13.3437
9.1	31.7533	29.4507	27.1481	24.8456	22.5429	20.2404	17.9378	15.6352	13.3326
9.2	31.7424	29.4398	27.1372	24.8346	22.5320	20.2294	17.9268	15.6243	13.3217
9.3	31.7315	29.4290	27.1264	24.8238	22.5212	20.2186	17.9160	15.6135	13.3109
9.4	31.7208	29.4183	27.1157	24.8131	22.5105	20.2079	17.9053	15.6028	13.3002
9.5	31.7103	29.4077	27.1051	24.8025	22.4999	20.1973	17.8948	15.5922	13.2896
9.6	31.6998	29.3972	27.0946	24.7920	22.4895	20.1869	17.8843	15.5817	13.2791
9.7	31.6894	29.3868	27.0843	24.7817	22.4791	20.1765	17.8739	15.5713	13.2688
9.8	31.6792	29.3766	27.0740	24.7714	22.4688	20.1663	17.8637	15.5611	13.2585
9.9	31.6690	29.3664	27.0639	24.7613	22.4587	20.1561	17.8535	15.5509	13.2483

N \ u	$N \times 10^{-6}$	$N \times 10^{-5}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-3}$	$N \times 10^{-2}$	$N \times 10^{-1}$	N
1.0	13.2383	10.9357	8.6332	6.3315	4.0379	1.8229	0.2194
1.1	13.1430	10.8404	8.5379	6.2363	3.9436	1.7371	.1860
1.2	13.0560	10.7534	8.4509	6.1494	3.8576	1.6595	.1584
1.3	12.9759	10.6734	8.3709	6.0695	3.7785	1.5889	.1355
1.4	12.9018	10.5993	8.2968	5.9955	3.7054	1.5241	.1162
1.5	12.8328	10.5303	8.2278	5.9266	3.6374	1.4645	.1000
1.6	12.7683	10.4657	8.1634	5.8621	3.5739	1.4092	.08631
1.7	12.7077	10.4051	8.1027	5.8016	3.5143	1.3578	.07465
1.8	12.6505	10.3479	8.0455	5.7445	3.4581	1.3098	.06471
1.9	12.5964	10.2939	7.9915	5.6906	3.4050	1.2649	.05620
2.0	12.5451	10.2426	7.9402	5.6394	3.3547	1.2227	.04890
2.1	12.4964	10.1938	7.8914	5.5907	3.3069	1.1829	.04261
2.2	12.4498	10.1473	7.8449	5.5443	3.2614	1.1454	.03719
2.3	12.4054	10.1028	7.8004	5.4999	3.2179	1.1099	.03250
2.4	12.3628	10.0603	7.7579	5.4576	3.1763	1.0762	.02844
2.5	12.3220	10.0194	7.7172	5.4167	3.1365	1.0443	.02491
2.6	12.2828	9.9802	7.6779	5.3776	3.0983	1.0139	.02185
2.7	12.2450	9.9425	7.6401	5.3400	3.0615	.9849	.01918
2.8	12.2087	9.9061	7.6038	5.3037	3.0261	.9573	.01686
2.9	12.1736	9.8710	7.5687	5.2687	2.9920	.9309	.01482
3.0	12.1397	9.8371	7.5348	5.2349	2.9591	.9057	.01305
3.1	12.1069	9.8043	7.5020	5.2023	2.9273	.8815	.01149
3.2	12.0751	9.7726	7.4703	5.1706	2.8965	.8583	.01013
3.3	12.0444	9.7418	7.4395	5.1399	2.8668	.8361	.008939
3.4	12.0145	9.7120	7.4097	5.1102	2.8379	.8147	.007891
3.5	11.9855	9.6830	7.3807	5.0813	2.8099	.7942	.006970
3.6	11.9574	9.6548	7.3526	5.0532	2.7827	.7745	.006160
3.7	11.9300	9.6274	7.3252	5.0259	2.7563	.7554	.005448
3.8	11.9033	9.6007	7.2985	4.9993	2.7306	.7371	.004820
3.9	11.8773	9.5748	7.2725	4.9735	2.7056	.7194	.004267
4.0	11.8520	9.5495	7.2472	4.9482	2.6813	.7024	.003779
4.1	11.8273	9.5248	7.2226	4.9236	2.6576	.6859	.003349
4.2	11.8032	9.5007	7.1985	4.8997	2.6344	.6700	.002969
4.3	11.7797	9.4771	7.1749	4.8762	2.6119	.6546	.002633
4.4	11.7567	9.4541	7.1520	4.8533	2.5899	.6397	.002336
4.5	11.7342	9.4317	7.1295	4.8310	2.5684	.6253	.002073
4.6	11.7122	9.4097	7.1075	4.8091	2.5474	.6114	.001841
4.7	11.6907	9.3882	7.0860	4.7877	2.5268	.5979	.001635
4.8	11.6697	9.3671	7.0650	4.7667	2.5068	.5846	.001453
4.9	11.6491	9.3465	7.0444	4.7462	2.4871	.5721	.001291
5.0	11.6289	9.3263	7.0242	4.7261	2.4679	.5598	.001148
5.1	11.6091	9.3065	7.0044	4.7064	2.4491	.5478	.001021
5.2	11.5896	9.2871	6.9850	4.6871	2.4306	.5362	.0009086
5.3	11.5706	9.2681	6.9659	4.6681	2.4126	.5250	.0007956
5.4	11.5519	9.2494	6.9473	4.6495	2.3948	.5140	.0007196
5.5	11.5336	9.2310	6.9289	4.6313	2.3775	.5034	.0006409
5.6	11.5155	9.2130	6.9109	4.6134	2.3604	.4930	.0005708
5.7	11.4978	9.1953	6.8932	4.5958	2.3437	.4830	.0005085
5.8	11.4804	9.1779	6.8758	4.5785	2.3273	.4732	.0004532
5.9	11.4633	9.1608	6.8588	4.5615	2.3111	.4637	.0004039
6.0	11.4465	9.1440	6.8420	4.5448	2.2953	.4544	.0003601
6.1	11.4300	9.1275	6.8254	4.5283	2.2797	.4454	.0003211
6.2	11.4138	9.1112	6.8092	4.5122	2.2645	.4366	.0002864
6.3	11.3978	9.0952	6.7932	4.4963	2.2494	.4280	.0002555
6.4	11.3820	9.0795	6.7775	4.4806	2.2346	.4197	.0002279
6.5	11.3665	9.0640	6.7620	4.4652	2.2201	.4115	.0002034
6.6	11.3512	9.0487	6.7467	4.4501	2.2058	.4036	.0001816
6.7	11.3362	9.0337	6.7317	4.4351	2.1917	.3959	.0001621
6.8	11.3214	9.0189	6.7169	4.4204	2.1779	.3883	.0001448
6.9	11.3068	9.0043	6.7023	4.4059	2.1643	.3810	.0001293
7.0	11.2924	8.9899	6.6879	4.3916	2.1508	.3738	.0001155
7.1	11.2782	8.9757	6.6737	4.3775	2.1376	.3668	.0001032
7.2	11.2642	8.9617	6.6598	4.3636	2.1246	.3599	.00009219
7.3	11.2504	8.9479	6.6460	4.3500	2.1118	.3532	.00008239
7.4	11.2368	8.9343	6.6324	4.3364	2.0991	.3467	.00007364
7.5	11.2234	8.9209	6.6190	4.3231	2.0867	.3403	.00006583
7.6	11.2102	8.9076	6.6057	4.3100	2.0744	.3341	.00005886
7.7	11.1971	8.8946	6.5927	4.2970	2.0623	.3280	.00005263
7.8	11.1842	8.8817	6.5798	4.2842	2.0503	.3221	.00004707
7.9	11.1714	8.8689	6.5671	4.2716	2.0386	.3163	.00004210
8.0	11.1589	8.8563	6.5545	4.2591	2.0269	.3106	.00003767
8.1	11.1464	8.8439	6.5421	4.2467	2.0155	.3050	.00003370
8.2	11.1342	8.8317	6.5298	4.2346	2.0042	.2996	.00003015
8.3	11.1220	8.8195	6.5177	4.2226	1.9930	.2943	.00002699
8.4	11.1101	8.8076	6.5057	4.2107	1.9820	.2891	.00002415
8.5	11.0982	8.7957	6.4939	4.1990	1.9711	.2840	.00002162
8.6	11.0865	8.7840	6.4823	4.1874	1.9604	.2790	.00001930
8.7	11.0750	8.7725	6.4707	4.1759	1.9498	.2742	.00001733
8.8	11.0636	8.7610	6.4593	4.1646	1.9393	.2694	.00001552
8.9	11.0523	8.7497	6.4480	4.1534	1.9290	.2647	.00001390
9.0	11.0411	8.7386	6.4368	4.1423	1.9187	.2602	.00001245
9.1	11.0300	8.7275	6.4258	4.1313	1.9087	.2557	.00001115
9.2	11.0191	8.7166	6.4148	4.1205	1.8987	.2513	.000009988
9.3	11.0083	8.7058	6.4040	4.1098	1.8888	.2470	.000008948
9.4	10.9976	8.6951	6.3934	4.0992	1.8791	.2429	.000008018
9.5	10.9870	8.6845	6.3828	4.0887	1.8695	.2387	.000007185
9.6	10.9765	8.6740	6.3723	4.0784	1.8599	.2347	.000006439
9.7	10.9662	8.6637	6.3620	4.0681	1.8505	.2308	.000005771
9.8	10.9559	8.6534	6.3517	4.0579	1.8412	.2269	.000005173
9.9	10.9458	8.6433	6.3416	4.0479	1.8320	.2231	.000004637

Véase en la página del Capítulo 6. la fórmula de Theis y la definición de los términos.

Los valores de $W(u)$ para aquéllos de u comprendidos entre 1×10^{-15} y 1×10^{-3}, fueron calculados por R. G. Kazmann con la asistencia de M. M. Evans, del U.S. Geological Survey; los valores de u comprendidos entre 1×10^{-3} y 9.9, se adaptaron de las Tablas de Integrales Exponenciales y Trigonométricos.

Tomado del Water Supply Paper 887, del U.S. Geological Survey, 1942.

cociente t/t', en papel semilogarítmico, quedará definida una línea recta, siempre que las condiciones se hallen dentro de los límites de validez de la fórmula modificada de no equilibrio.

Referencia del Texto: Capítulo 17; página 395 Extractos del "Estudio preliminar sobre la Corrosión de los Pozos de Agua en la Cuenca de Chad, Nigeria," preparado por Frank Clarke e Iván Barnes.

"Los estudios preliminares de tres pozos ampliamente separados que interceptan la zona acuífera central de la Formación Chad, en los Emiratos de Bornu y Dikwa, al noreste de Nigeria, han demostrado que los elementos de hierro y acero de los pozos tienen la propensión a corroerse en todo este sistema de explotación de aguas subterráneas. Los potenciales de oxidación - reducción relativamente bajos, los valores de pH y el contenido relativamente alto de dióxido de carbono libre puesto en evidencia por los ensayos realizados, son extremadamente destructores de los componentes hechos a base de metales ferruginosos.

"Resulta casi imposible evitar la corrosión de los elementos de los pozos mediante tratamiento químico, revestimiento de los metales, o protección catódica en tal medio acuoso y particularmente en estos sitios tan remotes. Por lo tanto, la única posibilidad de asegurar un largo período de servicio es mediante el empleo de materiales resistentes a la corrosión.

"Se considera que la óptima combinación para la construcción de nuevos pozos es la del empleo de rejillas de acero inoxidable Tipo 304, conjuntamente con ademes ya sea de acero inoxidable, o de fibra de vidrio aglutinada con resinas epozy . . ."

Naturaleza de los Problemas de Corrosión

En la Fig. 321, se muestra un ejemplo característico de los daños causados por corrosión responsables del deterioro de ademes de acero de pequeño diámetro, como también de rejillas. Este pedazo de ademe de acero de 6.4 cm. de diámetro, fue retirado de Borehole Middleton (GSN 2412), un pozo naturalmente surgente, a unos 8 km. al sur de Arege, la que a su vez se halla localizada al noroeste de Kauwa. En el espécimen se observan claramente tanto una severa pérdida general de metal como un agujereamiento localizado. El daño se concentró en el interior del tubo, pero también en la superficie exterior se manifiesta un agujereamiento localizado de mucha significación. También son evidentes en el interior, los productos aislados de la corrosión. Los restos que se observan de una capa externa protectora de zinc, demuestran que el ademe consistió originalmente de tubo galvanizado."

Se realizaron pruebas de corrosión utilizando un tipo de sonda, que consiste de un elemento de alambre de forma de horquilla, tal como se muestra en la *Fig. 321b*. La resistencia eléctrica del elemento conductor varía si hay pérdida de metal por ataque corrosivo. La pérdida de metal expresada como una fracción de centímetro por año, se calcula mediante la variación de resistencia que tiene lugar durante cierto tiempo de exposición.

El grado de severidad de la corrosión se expresa de acuerdo con la siguiente clasificación:

Profundidad del Ataque	Pérdida de Metal, cm. por año
Insignificante	0 a 0.0051
Moderada	0.0051 a 0.0508
Severa	0.0508 a 0.1270
Extrema	0.1270 o mayor

En esta forma se pueden colocar varias sondas simultáneas dentro de una corriente que fluya, para así comparar diversos materiales.

"Para que resulte lo más efectiva posible, la sonda de corrosión debe instalarse en el área más vulnerable de la instalación como, por ejemplo, la rejilla o aquella parte del ademe que se corroe más rápidamente. Ya que estas áreas no son accesibles para la instalación de sondas, éstas se colocan en las partes verticales o horizontales del ademe o de la línea de descarga del pozo por sobre el nivel del terreno.

"El estudio de las aguas corrosivas que se describe en este informe se ha basado en dos enfoques diferentes de investigación. Uno de éstos, directo y empírico, se caracteriza por el empleo de sondas experimentales de corrosión introducidas en el ademe de los pozos. El efecto que las aguas ejercen sobre estos especímenes de prueba se determina midiendo las variaciones de resistencia eléctrica que se manifiestan en sus elementos de alambre metálico. Este enfoque empírico tiene diversas ventajas, puesto que el ataque de la corrosión se mide directamente; además, no se necesita hacer suposiciones sobre la causa de la corrosión. La medida del ataque viene a ser la suma de todos los factores que contribuyen a ello, por lo que el análisis de los datos resulta muy sencillo. Los estudios de corrosión mediante sondas también tienen sus deficiencias. Cuando únicamente se utiliza este método, no se obtiene información acerca de las causas de la corrosión. Los datos que se derivan del empleo del procedimiento no explican por qué una agua es sólo moderadamente corrosiva, o la razón de que otra lo sea en extremo.

Causa Probable de la Corrosión

"Se siguió también una segunda línea de investigación para llegar a descubrir el motivo de que las aguas que se estudiaron fueran corrosivas. Mediante la medición del Eh, pH, y la composición química, se



Fig. 321a: Aspecto de la superficie interior de un tubo de acero de pequeño diámetro severamente corroído, que se utilizó como ademe de pozo en Chad Basin, Nigeria. *Cortesía de Frank Clarke.*

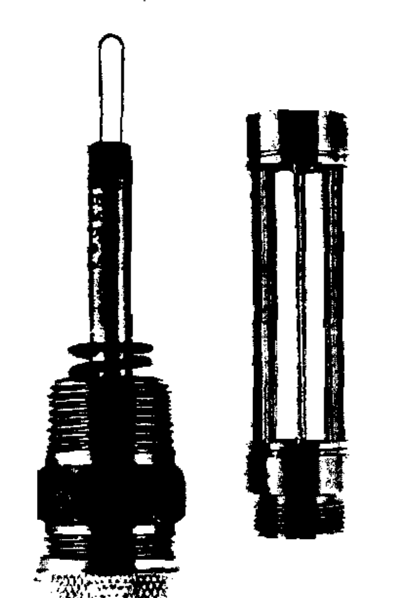


Fig. 321b: Elemento de alambre metálico de forma de horquilla empleado para determinar la velocidad relativa del ataque corrosivo. *Cortesía de Frank Clarke.*

calcularon las solubilidades teóricas de las posibles fases sólidas comparándolas luego con la composición real del agua. Si se conocen las desviaciones que experimenta el agua a partir de la saturación con respecto a estos sólidos, además de cómo se comportan estos últimos, se puede predecir la respuesta o funcionamiento del sistema completo. Por vía de ejemplo, supongamos que cierta agua no se halla saturada de hierro metálico ni de ninguna de las otras fases sólidas posibles de éste último. $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$, Fe_2O_3, Fe_3O_4, $FeCO_3$ y otros más. Esta agua sería extremadamente corrosiva puesto que el hierro metálico se disolvería en la solución no saturada, corroyéndose de este modo. Los productos de la siguiente reacción anódica,

$$Fe^0 \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$$

tienden a alterar la composición del agua y en consecuencia las desviaciones a partir de la saturación, con respecto a todos los sólidos que contengan Fe (Hierro). Si el agua se encuentra en reposo, se podrían predecir en forma cualitativa los cambios que podría sufrir su composición, pero pronosticar la composición cuantitativa final del agua resultaría en extremo difícil. Si el pozo se encuentra descargando, el problema es menos difícil, puesto que el agua está siendo contínuamente repuesta por agua fresca de la misma composición. La interpretación de los estados de saturación, medidos y calculados en la forma en que se describe en este informe, sólo es válida para los pozos que se hallen descargando y para una composición constante del agua. Estas restricciones no presentan tanto obstáculo como podría parecer, ya que los pozos de Nigeria han sido perforados para abastecimiento de agua y la condición de flujo se mantiene aproximadamente aún en los perídos de descarga intermitente.

"La relación calculada entre la saturación real y las composiciones observadas del agua . . . demuestra que todas las aguas de pozo representadas por las muestras analizadas se hallan no saturadas con respecto al hierro metálico.

"Como consecuencia de ello, es de esperar que el metal sea corroído, a menos que las superficies se recubran con una película protectora o costra de algún material diferente al hierro metálico. Hay que descartar las películas de carbonato de calcio (calcita), $Fe(OH)_2$ y $Fe(OH)_3$, puesto que el agua ha demostrado no hallarse saturada con respecto a estos sólidos. Esta se encuentra sobresaturada de Fe_2O_3 y de Fe_3O_4. No obstante, a bajas temperaturas y en soluciones diluídas, el primer precipitado del ión férrico no es óxido anhídrico, hematita, Fe_2O_3, aunque la hematita sea la fase estable. En su lugar, el primer precipitado es el hidróxido, $Fe(OH)_3$ y solamente después de un tiempo prolongado, éste se deshidrata para formar hematita, Fe_2O_3. En estas condiciones la hematita no llega a formar una película protectora, puesto que el precursor meta-estable $Fe(OH)_3$ no se separa de una solución que se halle no saturada con respecto al $Fe(OH)_3$. La Magnetita, Fe_3O_4, forma a menudo una película oscura que recubre las superficies en corrosión, y reviste en el acero dúctil los agujeros producidos por el efecto corrosivo. Esta película aparentemente no resulta protectora en un medio tal. A pesar de su presencia, se manifiesta una corrosión progresiva, lo que indica que la película es permeable tanto al agua, como a los iones ferrosos que emigran del hierro metálico.

"Se encontró que tanto las aguas de Dalori como las de Kauwa se hallaban sobresaturadas de $FeCO_3$ (siderita) la que en teoría se va depositando en el ademe de los pozos, a menos que ello se evite con otros procedimientos. Si tal deposición tiene lugar, ésta resultará ineficaz para proteger al hierro de una corrosión extremadamente severa. Como se ve, la permeabilidad de la deposición, es de nuevo la posible explicación.

"Como se puede observar, la causa fundamental de la corrosión en los pozos de Nigeria, es la falta de sobresaturación con sólidos capaces de formar películas protectoras en las superficies de hierro, las que a su vez son inestables en las aguas que se han estudiado.

"El bajo potencial oxidante-reductor, (Eh) indica la presencia de un medio reductor y una relación de ión ferroso a ión férrico, relativamente alta. Esta condición tiene la tendencia a impedir la formación de películas protectoras de óxido sobre el acero, y aún a disolver el hierro desprotegido. El contenido real de ión ferroso de todas las tres aguas de pozo, se hallaba muy por debajo de los valores de equilibrio, suponiendo que el $Fe(OH)_3$ representa el regulador de solubilidad, y muy por encima de las concentraciones de equilibrio correspondientes al factor Fe_2O_3. Esto nos indica que la base del equilibrio del hierro, es algún producto de transición, no identificado, entre la forma hidratada, $Fe(OH)_3$ y la forma deshidratada, Fe_2O_3. La corrosión del ademe de acero contribuye con iones ferrosos en exceso de los que se derivan del acuífero; sin embargo, esto pareciera ser una pequeña fracción del total. Asimismo, como en el caso de la reacción del dióxido de carbono, los factores cinéticos impiden obtener el verdadero equilibrio. Bastaría con decir que las aguas de pozo con relaciones Eh-pH del tipo observado en este caso, causarían efectos corrosivos extremadamente severos en los componentes de acero y de hierro de los pozos.

Regulación de la Corrosión

"Las principales medidas para prevenir la corrosión que se usan en los pozos de agua consisten de la aplicación de recubrimientos protectores a las partes metálicas, protección catódica, tratamiento químico del agua del pozo, esterilización con cloro u otro reactivo químico adecuado cuando se hallan involucrados ciertos procesos bacterianos, aislamiento eléctrico para evitar los efectos galvánicos, y el empleo de materiales resistentes a la corrosión. De todas estas posibilidades, pareciera que solamente el uso de materiales resistentes a la corrosión resulta práctico en los dispersos pozos de Chad Basin. Los recubrimientos protectores no son por lo general durables como para servicios a largo plazo, a menos que también se aplique la protección catódica que evite el deterioro del metal en aquellos puntos en que inevitablemente se perforan los materiales de recubrimiento. La protección catódica, sea que se use o no con recubrimiento de las superficies metálicas, resulta relativamente costosa de instalar y mantener, difícil de regular y no puede usarse en sitios remotos. El tratamiento de las aguas de pozo mediante reactivos químicos que neutralicen o inhiban la corrosión, tales como la cal, resulta inútil a menos que el reactivo sea introducido hasta el fondo del pozo y esto sería casi imposible y demasiado costoso en el caso de los pozos de Chad Basin.

"Los materiales resistentes a la corrosión que se emplean corrientemente en las rejillas de pozo, y con menos frecuencia en las tuberías de ademe, incluyen el bronce amarillo, el bronce rojo, el bronce Everdur (bronce mangánico-silícico), acero inoxidable Tipo 304, aluminio de alta resistencia y plásticos tales como el polietileno y la fibra de vidrio aglutinada con resinas epoxy. De todos estos materiales, sólo el acero inoxidable y los plásticos son susceptibles de brindar un servicio económicamente viable y duradero en el caso de las aguas extremadamente corrosivas de Chad Basin. En el bronce amarillo es de esperarse que ocurra la pérdida de zinc. El bronce rojo y el bronce Everdur podrían comportarse razonablemente bien si no se hallan presentes la bacteria reductora del sulfato y los compuestos sulfurosos resultantes, pero el sulfuro es un compuesto muy común en los medios anaeróbicos . . . En dos pozos, las sondas de aluminio

demostraron que el ataque era muy limitado, pero no sería prudente la utilización de esta aleación en aguas subterráneas que contienen indicios de concentración de cobre, especialmente cuando el precio es más de dos veces el del acero dúctil.

"El acero inoxidable se adapta en forma ideal al uso prolongado en aguas del tipo hallado en estos experimentos. A la vez que su superfice se protege de la corrosión mediante una película microscópica de óxido que no es autorestaurable en ausencia de oxígeno disuelto, el deterioro no es susceptible de ocurrir en un pozo de condiciones anaeróbicas ya que a su vez la ausencia de oxígeno reduce la desplorazación catódica. La curva de velocidad horizontal de corrosión obtenida mediante las sondas de acero inoxidable en los pozos de Dalori y Ngala durante la realización de este estudio confirman plenamente la excelente resistencia de esta aleación. Igual comportamiento se observó en muchos otros pozos profundos, incluyendo los del Desierto Occidental de Egipto y en las Planicies de Indus, en el Pakistán Occidental."

Referencia del Texto: Capitulo 20, página 452. Valores selectos de pérdida por fricción en tubería y accesorios.

Tabla XXXVIII

Pérdida de Carga por Fricción en Tuberías Lisas* (Pérdida approximada de carga, en metros por 1,000 metros de tubería)

Caudal lps	Caudal Diámetro Nominal de la Tubería, en pulgadas (mm)										
	1¼ (31.8)	1½ (38.1)	2 (50.8)	2½ (63.5)	3 (76.2)	4 (101.6)	5 (127.0)	6 (152.4)	8 (203.2)	10 (254.0)	12 (304.8)
0.63	20	9	2								
0.95	44	20	6								
1.26	79	35	10	4	1						
1.58	123	55	16	6	2						
1.89	178	79	22	9	3						
2.52		142	40	16	5						
3.15		222	64	25	8	2					
3.78			90	37	11	3					
4.73			140	57	18	4	1				
6.31			258	102	30	8	2				
7.89				159	46	12	3				
9.46				228	68	17	5	2			
11.04					90	23	7	2			
12.61					122	30	9	3	1		
15.77						47	14	5			
18.92						70	20	8	2		
22.08						93	27	11			
25.23						123	35	14	3		
31.54						191	54	21	5	2	
37.85							78	31	7		
47.31							122	48	11	3	
63.08								86	19	6	2
94.62								194	43	15	5
126.17									76	22	10

*En tubería rugosa, agréguese un 50 por ciento.

Tabla XXXIX

Pérdida de Carga Equivalente Aproximada en Accesorios de Tubería

(Expresda en metros de tubería recta)

Tipo de Accesorio	Diámetro Nominal del Tubo, en pulgadas (mm, Tabla XXXVIII)											
Codo de 90	1.1	1.4	1.7	2.0	2.4	2.9	3.4	4.3	4.9	6.4	7.9	9.8
Codo de 45	0.5	0.6	0.8	0.9	1.2	1.4	1.5	1.8	2.4	3.0	4.0	4.6
Codo de 90 de radio largo	0.8	0.9	1.2	1.4	1.5	1.8	2.1	2.7	3.4	4.3	5.2	6.1
Tes	Ver nota al pie											
Reduccion (una etapa extremo grande)	0.6	0.8	0.9	1.1	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.66	4.6	5.5
Valvula de compuerta (abierta)	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Valvula de compuerta (abierta hasta la mitad)	5.5	7.6	10.7	12.8	15.2	17.7	19.8	24.4	30.5	39.6	51.8	61.0
Valvula de globo (abierta)	10.7	13.7	16.8	20.4	24.4	30.5	35.1	42.7	48.8	65.5	86.9	103.7
Valvula angular (abierta)	5.5	7.3	9.1	10.7	12.2	15.2	16.8	21.3	24.4	33.5	42.7	53.4
Valvula de charnela	2.7	3.4	4.0	4.9	6.1	7.0	7.6	9.8	15.9	13.7	19.8	24.4

Las tes varían según la dirección del flujo a través de éstas. Para flujo recto a través, la pérdida de carga es prácticamente igual a la que se produce en un codo de 90° de radio largo; cuando el flujo tiene lugar a través del ramal, la pérdida de carga es aproximadamente tres veces mayor.

Indice . . .